



Ecole Doctorale n°432
« Sciences des Métiers de l'Ingénieur »

N°attribué par la bibliothèque

____/____/____/____/____/____/____/____/____/____/

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité "Energétique"

présentée et soutenue publiquement par
Bruno DUPLESSIS

le 2 décembre 2008

**Mise en œuvre des contrats de performance énergétique pour
l'amélioration des installations de production frigorifique**

**Implementation of energy performance contracts for the improvement of
chilled water plant**

Directeur de thèse : Jérôme ADNOT & Dominique MARCHIO

Jury :

Alain TROMBE, Université de Toulouse 3Président
Francis ALLARD, Université de La Rochelle Rapporteur
Bernard BOURGES, Ecole des Mines de Nantes Rapporteur
Jérôme ADNOT, Mines Paristech Examineur
Dominique MARCHIO, Mines ParisTech Examineur
Olivier MORISOT, Elyo Examineur
Frédéric ROSENSTEIN, ADEME Examineur

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'équipe Maîtrise de la Demande en Energie du Centre Energétique et Procédés de l'Ecole des Mines de Paris.

Je voudrais commencer par remercier Francis ALLARD, Professeur à l'Université de La Rochelle, et Bernard BOURGES, professeur à l'Ecole des Mines de Nantes pour l'intérêt porté à ce travail et pour avoir accepté d'en être les rapporteurs. Je souhaite ensuite remercier Alain TROMBE, professeur à l'Université de Toulouse III d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Ces travaux n'auraient pas vu le jour sans Olivier MORISOT, ingénieur chez Elyo et à Frédéric ROSENSTEIN, ingénieur à l'ADEME, qui ont été à l'origine des développements de mes travaux scientifiques à travers des collaborations établies entre le Centre Energétique et Procédés et leurs établissements respectifs. Je tiens donc à les remercier ici pour la qualité des échanges et les relations de confiance qui se sont établis entre nous, et pour leur disponibilité tout au long de ces années et en particulier pour leur présence lors de ma soutenance.

Ma venue au Centre Energétique et Procédés ne doit rien au hasard. Je tiens tout particulièrement à remercier Jérôme ADNOT pour m'avoir proposé de rejoindre le CEP-Paris et Dominique MARCHIO pour avoir facilité mon intégration à leurs équipes de recherche. Je les remercie pour leur soutien et leurs conseils durant ces années, mais également pour la grande liberté qui m'a été laissée dans l'organisation de mon travail et dans la rédaction de ce document. J'espère avoir été à la hauteur de cette confiance qu'ils m'ont témoignée.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à Denis CLODIC pour m'avoir accueilli au sein du CEP-Paris, à Anne-Marie POUGIN et Aline GARNIER pour leur soutien administratif et logistique et à Philippe CALVET pour avoir assuré le bon fonctionnement de mon outil de travail durant ces années.

Je voudrais ensuite faire part de mes remerciements et de mon amitié aux membres et anciens membres du CEP. Je remercie en particulier Daniela, Maxime, Pascal, Philippe pour leur présence au quotidien depuis le début de cette aventure et pour leurs conseils avisés, mais également Anthony et Laurent pour leur bonne humeur autour d'un café. Un grand merci à Elias, Marcello et Benoît pour avoir supporté ma présence dans le bureau et mes débordements lors des dernières semaines de rédaction, ainsi qu'à Mikael, Julien et David.

J'adresse également mes remerciements à Michèle DUPUY, Jocelyne et Thérèse pour

la préparation de ce magnifique pot de thèse le jour de la soutenance, ce qui m'a permis d'aborder le jour J plus sereinement.

Enfin, une thèse est aussi une « épreuve familiale », j'adresserai plus que des remerciements à mes parents, sans qui tout ceci n'aurait jamais pu voir le jour et pour ce qu'ils m'ont apporté durant ces 29 dernières années. Qu'ils puissent recueillir ici quelques modestes fruits de leurs efforts et de leur dévouement envers mes frères et moi.

Je terminerai en remerciant affectueusement Anne Laure pour son soutien sans faille, pour la patience avec laquelle elle a supporté mes inégalités d'humeur, mes manques de disponibilité, notamment durant ces derniers mois, et « l'expression quelques fois irritante de mes incertitudes »...

Table des matières

Introduction	1
I Amélioration de l'efficacité énergétique par les services énergétiques	5
Introduction	7
1 Les services énergétiques : des prestations autour de la fourniture d'énergie	9
1.1 Typologie d'un contrat de services énergétiques	11
1.1.1 Prestations élémentaires	11
1.1.2 Portée d'un contrat de services énergétiques	14
1.1.3 Modalités et conditions de rémunération d'un contrat de services . .	15
1.2 Exemples de services énergétiques : les marchés d'exploitation des installations de chauffage	16
1.2.1 Portée et contenu des contrats d'exploitation des installations de chauffage	16
1.2.2 Modalités de rémunération des contrats d'exploitation des installations de chauffage	19
1.2.3 Rémunération par prix forfaitaire : méthode de révision des prix . .	20
1.2.4 Rémunération par prix unitaire	22
1.2.5 Bilan : typologie des contrats d'exploitation des installations de chauffage	25
1.3 Les contrats de fourniture d'énergie frigorifique	26
1.3.1 Portée et contenu des contrats de fourniture d'énergie frigorifique .	26
1.3.2 Modalités de rémunération des contrats de fourniture d'énergie frigorifique	28
1.3.3 Bilan : typologie des contrats d'exploitation des installations de production d'énergie frigorifique	29
2 Évaluation de l'efficacité énergétique portée par un contrat de services énergétiques	31
2.1 Influence de la structure des contrats de services énergétiques sur leur contenu en efficacité énergétique	32
2.1.1 Méthode d'évaluation du potentiel en efficacité énergétique d'un contrat de services énergétiques	32

2.1.2	Influence du contenu d'un contrat sur son potentiel en efficacité énergétique	33
2.1.3	Influence de la portée d'un contrat sur son potentiel en efficacité énergétique	36
2.1.4	Influence des modalités de rémunération sur le comportement des acteurs	37
2.1.5	Synthèse	38
2.2	Application aux marchés d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique	40
2.2.1	Efficacité énergétique portée par le prestataire	40
2.2.2	Efficacité énergétique portée par le client	45
2.2.3	Bilan sur l'efficacité énergétique portée par les contrats d'exploitation des installations de chauffage ou de production frigorifique . . .	49
3	Offres de services énergétiques dédiée à l'amélioration de l'efficacité énergétique	51
3.1	Les clauses d'intéressement aux économies d'énergie	51
3.1.1	Introduction de dispositions de valorisation des économies d'énergie par les pouvoirs publics	51
3.1.2	Impact des clauses d'intéressement aux économies d'énergie sur l'efficacité énergétique portée par les contrats de services énergétiques .	53
3.2	Du contrat de performance énergétique	55
3.2.1	Les « ESCOs »	55
3.2.2	La question du financement : auto-financement ou financement par l'ESCO	57
3.2.3	Le « financement par tiers » : un concept ambigu	60
3.2.4	Procédure de mise en place d'un contrat de performance énergétique	61
3.2.5	La contractualisation de la performance énergétique	63
3.3	Etudes de cas	65
3.3.1	Etude de cas n°1	65
3.3.2	Etude de cas n°2	68
3.3.3	Bilan sur les études de cas	73
4	Intégration des contrats de performance énergétique dans les outils de commande publique	75
4.1	La commande publique	76
4.1.1	L'inélicabilité de la maîtrise d'ouvrage publique	76
4.1.2	Les marchés publics	77
4.1.3	Les principes de l'appel d'offres	79
4.1.4	Procédures d'appel d'offres	82
4.1.5	Synthèse sur les procédures d'appel d'offres pour l'attribution de marché public	87
4.2	La délégation de service public	88
4.2.1	Principes	88
4.2.2	Evaluation du contenu en efficacité	89
4.3	Les contrats globaux	89
4.3.1	Le Bail Emphytéotique Administratif (BEA)	89

4.3.2	Le contrat de partenariat	90
4.3.3	Analyse du contenu en efficacité énergétique	91
4.4	Intégration des contrats de performance énergétique dans la commande publique	92

Conclusion	95
-------------------	-----------

II Développement d'un protocole d'évaluation des performances énergétiques des installations de production frigorifique 97

Introduction	99
---------------------	-----------

5 Protocoles d'évaluation des économies d'énergie	101
--	------------

5.1	Principes	101
5.1.1	Périmètre d'évaluation	101
5.1.2	Période d'évaluation	103
5.1.3	Principe de l'ajustement des consommations	105
5.1.4	Recherche des modèles d'ajustement	108
5.1.5	Collecte des données	111
5.2	Mise en œuvre des protocoles d'évaluation des économies d'énergie	113
5.2.1	Approche « ensemble du bâtiment »	113
5.2.2	Approche « isolement des améliorations »	119
5.2.3	Approche « simulation calibrée de l'ensemble du bâtiment »	125
5.2.4	Sélection d'un protocole d'évaluation	128

6 Protocole de mesure des performances des installations de production d'eau glacée	133
--	------------

6.1	Objet du protocole d'évaluation	133
6.1.1	La climatisation dans les immeubles de bureaux	133
6.1.2	Les installations de production d'eau glacée pour la climatisation des bâtiments	135
6.1.3	Définition du périmètre d'évaluation et choix de l'approche d'évaluation	140
6.2	Grandeurs caractéristiques des systèmes évalués	143
6.2.1	Groupes de production d'eau glacée	143
6.2.2	Effets interactifs	146
6.2.3	Besoins d'énergie frigorifique	147
6.3	Protocole de mesure	148
6.3.1	Critères d'exactitude requis	148
6.3.2	Mesure de la puissance électrique	150
6.3.3	Mesure du débit	150
6.3.4	Mesure de la température	152
6.3.5	Évaluation de la capacité calorifique de l'eau glycolée	153
6.3.6	Conditions d'essais	153
6.3.7	Enregistreurs et stockage des données	153
6.3.8	Traitement des données avant exploitation	154

7	Évaluation des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée	157
7.1	Données expérimentales	157
7.2	Evaluation des performances énergétiques des groupes de production d'eau glacée	159
7.2.1	Détermination de relations explicatives à partir de mesures in situ	159
7.2.2	Modèles paramétriques	163
7.3	Représentation du comportement des tours de refroidissement	174
7.3.1	Modèle empirique	174
7.3.2	Modèles paramétriques	176
7.4	Analyse du plan de fonctionnement des installations de production frigorifique	183
7.5	Calcul des économies d'énergie	185
Bilan		191
	Evaluation des performances énergétiques des installations des production d'eau glacée	191
8	Intégration des améliorations des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée dans les systèmes de certificats d'économie d'énergie	195
8.1	Principes des systèmes de certificats d'économie d'énergie	196
8.1.1	Les instruments de politique publique pour l'amélioration de l'efficacité énergétique	196
8.1.2	Une obligation de réalisation d'économies d'énergie	197
8.1.3	Un mécanisme de flexibilité : l'échange de certificats	198
8.2	Emission des certificats d'économie d'énergie	198
8.2.1	Objectifs de la certification	198
8.2.2	Méthodes de certification	199
8.2.3	Additionnalité	201
8.3	Méthode de certification des améliorations des installations de production d'eau glacée	202
8.3.1	Principe de la méthode de calcul	203
8.3.2	Représentation ex-ante de la demande énergétique	205
8.3.3	Calcul du montant d'économie d'énergie	209
8.4	Bilan : certification ex-ante des améliorations des installations de production d'eau glacée	210
Conclusion		213
Nomenclature		215
Bibliographie		218
Liste des figures		228
Liste des tableaux		230

Introduction

Les services énergétiques comme levier d'amélioration de l'efficacité énergétique

Le secteur énergétique européen et en particulier les activités liées à la commercialisation des énergies ont profondément été modifiés cette dernière décennie sous l'impulsion des directives européennes relatives aux marchés du gaz et de l'électricité (cf. [Directive 2003/54/CE] et [Directive 2003/55/CE]). Dans le même temps, les engagements communautaires en matière d'amélioration de l'efficacité de la demande énergétique ont été renforcés par la directive relative à l'efficacité énergétique et aux services énergétiques ([Directive 2006/32]). L'article 6 de cette directive met en avant la promotion des services énergétiques comme levier d'amélioration de l'efficacité de la demande d'énergie finale.

Cette volonté s'appuie sur la constatation que le potentiel d'économies d'énergie par les services énergétiques semble rester encore inexploité. En effet, le marché des services énergétiques a été estimé à 150 millions d'euros par an en 2000, tandis que le marché potentiel se situe entre 5 et 10 milliards d'euros [Bertoldi, 2003].

Ainsi, [Directive 2006/32] prend acte qu'« il est possible d'améliorer l'efficacité énergétique dans les utilisations finales en augmentant l'offre et la demande de services énergétiques », et situe, ainsi, les services énergétiques parmi « les domaines prioritaires pour améliorer l'efficacité énergétique ». Elle engage les États Membres à promouvoir le marché des services énergétiques « par la voie de différents moyens, y compris non financiers », en précisant que « les États Membres devraient pouvoir choisir d'imposer la fourniture de ces services [...] aux distributeurs d'énergie, aux gestionnaires de réseaux de distribution ou aux entreprises de vente d'énergie au détail [...] ».

Ainsi, la France a affiché sa volonté de mettre en œuvre le contenu de cette directive dans les travaux qui ont eu lieu ces derniers mois dans le cadre du Grenelle de l'Environnement. Les récentes conclusions des chantiers opérationnels mis en place à cette occasion retranscrivent la nécessité de s'appuyer sur le développement d'une forme particulière de services énergétiques, le contrat de performance énergétique, pour améliorer l'efficacité énergétique dans les bâtiments existants [COMOP3, 2008].

Analyse de l'efficacité énergétique par les contrats de services énergétiques

Dans la première partie de ce document, nous avons donc d'abord cherché à analyser les fondements de ce constat, en commençant par mettre en place une typologie des contrats de services énergétiques (Chapitre 1). Cette typologie s'appuie sur le triptyque « prestations / portée / rémunération » pour caractériser le contenu des contrats

de services énergétiques. Cette typologie a été mise en œuvre sur les services énergétiques traditionnels portant sur l'exploitation des installations de chauffage et des installations de production frigorifique.

Nous avons ensuite analysé l'efficacité énergétique portée par les parties prenantes des contrats de services énergétiques en fonction des caractéristiques de ces contrats. Pour ce faire, nous avons défini une méthode d'évaluation qualitative de cette efficacité énergétique, avant de la mettre en œuvre sur les contrats de services énergétiques traditionnels (chapitre 2).

Le troisième chapitre de ce document entreprend de présenter des services énergétiques visant à l'amélioration de l'efficacité de la demande énergétique finale. Nous y présentons le concept de contrat de performance énergétique, dont le principe repose sur le financement de l'amélioration de la performance énergétique par les économies générées sur la facture énergétique. Nous montrons également que ce type de contrat repose sur la mise en place d'un protocole d'évaluation dont le but est de prouver les économies d'énergie générées par la réalisation d'améliorations de l'efficacité énergétique dans des conditions d'exploitation représentant au mieux la réalité.

Enfin, la directive [Directive 2006/32] insiste sur le rôle exemplaire que devrait se donner le secteur public en ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité énergétique de ses bâtiments et de ses installations, notamment par l'intermédiaire des services énergétiques. La France a pris des engagements ambitieux en matière d'amélioration de son propre patrimoine : l'objectif est d'engager dans les cinq prochaines années les travaux de rénovation des bâtiments publics de manière à réduire à terme de 50 % leurs émissions de gaz à effet de serre et de 30 à 40 % leurs consommations d'énergie. Enfin, dès 2010, les bâtiments publics neufs devront être construits de manière à atteindre les normes des bâtiments basse consommation ($50kWh/m^2$), ou seront passifs ou à énergie positive [COMOP4, 2008].

Nous avons donc cherché à savoir si les règles de passation de la commande publique étaient réellement adaptées à cet objectif. Pour cela, nous avons analysé les règles qui régissent la passation de marchés publics afin de mettre en évidence la nécessité d'adaptation de la commande publique pour le développement des contrats de performance énergétique dans ce secteur.

Développement d'un protocole d'évaluation des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée

La problématique de l'évaluation des performances énergétiques a été étudiée concrètement dans la deuxième partie de ce document, en développant un protocole d'évaluation des performances des installations de production d'eau glacée pour la climatisation des immeubles de bureaux. Après avoir décrit les objectifs et les principes des protocoles d'évaluation (chapitre 4), nous les mettons en œuvre en commençant par la mise au point d'un protocole de mesures dans le but de caractériser les principaux éléments des installations de production frigorifiques en exploitation (chapitre 5).

La mise au point d'un protocole d'évaluation requiert le développement de modèles

représentatifs du comportement et des performances des équipements évalués. Nous avons élaboré des procédures pour déterminer ces modèles représentatifs de manière à ce qu'elles puissent être mises en œuvre dans le cadre d'un contrat de performance énergétique. Ces modèles peuvent être définis à partir des mesures réalisées sur site sur les installations en exploitation, mais nous avons surtout cherché à mettre en place des procédures permettant de s'appuyer sur des données plus accessibles, comme les documents « constructeurs », pour caractériser les différents équipements (chapitre 6). Enfin, nous concluons sur les méthodes de calcul des économies d'énergie générées par certaines améliorations traditionnellement mises en œuvre sur les installations de production d'eau glacée.

Intégration des contrats de performance énergétique dans les outils de politiques publiques en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique

Parmi les outils de politiques publiques en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétiques, les systèmes de certificats d'économie d'énergie sont mis en avant par la directive relative à l'efficacité énergétique et aux services énergétiques [Directive 2006/32]. Ces systèmes de certificats d'économie d'énergie imposent aux fournisseurs d'énergie - au sens large - de justifier la réalisation d'économies d'énergie, et requiert de ce fait, la mise au point de méthodes de certification de ces économies d'énergie. La Grande Bretagne, l'Italie et la France notamment, ont mis en place de tels systèmes sur leur territoire.

L'efficacité de ces système repose sur des mécanismes de certification reproductibles de manière à minimiser le coût d'évaluation des économies d'énergies réalisées sur chaque site. Un tel système semble donc privilégier un certain type d'économies d'énergie générées par des actions élémentaires et généralisables. Dans ces conditions, il semble difficile de représenter les solutions d'amélioration des installations de production d'eau glacée de forte capacité, d'autant qu'il n'existe pas d'outil simple et opérationnel permettant de certifier la performance énergétique de ces installations.

A partir des procédures d'évaluation des performances énergétiques développées pour la mise en place de contrats de performance énergétique, nous avons cherché à les adapter pour permettre la prise en compte des solutions d'amélioration des performances énergétiques par les systèmes de certificats blancs (chapitre 7). Nous proposons donc une méthode de calcul d'économies d'énergies normalisées, qui pourraient permettre d'intégrer certaines améliorations réalisées sur les installations de production d'eau glacée dans le portefeuille des actions élémentaires éligibles aux certificats d'économie d'énergie.

Première partie

Amélioration de l'efficacité énergétique par les services énergétiques

Introduction

La fourniture d'énergie et de fluides est la plupart du temps accompagnée d'un ensemble de prestations que l'on appelle communément « services énergétiques ». Ces services recouvrent des prestations très diverses : fourniture de combustibles, exploitation et maintenance des équipements techniques, audit, fourniture d'équipements, financement de l'investissement, etc.. De la même manière, les mécanismes contractuels mis en place varient fortement d'un contrat de service à un autre. Cette diversité permet naturellement de répondre au mieux aux besoins des utilisateurs finals, mais a des conséquences parfois négatives en matière d'efficacité énergétique.

En réponse aux modifications du paysage énergétique et du contexte réglementaire, l'offre des sociétés de services énergétiques s'est enrichie de nouvelles formes contractuelles visant directement l'amélioration de l'efficacité énergétique. La mise en œuvre d'améliorations peut se traduire par la contractualisation de services énergétiques sous la forme de contrats de performance énergétique. En effet, apparu sous l'impulsion de sociétés de services énergétiques (ESCO) dont la rémunération est uniquement liée à l'amélioration des performances énergétiques, le contrat de performance énergétique semble être un moyen contractuel efficace pour favoriser le portage de projet en faveur de l'amélioration énergétique des installations. Le levier principal en faveur de la réalisation de projets d'amélioration est la garantie de résultat sur l'amélioration des performances énergétiques que porte le prestataire de services.

Après avoir exposé une typologie permettant de caractériser précisément la structure des contrats de services énergétiques classiques (chapitre 1), nous proposons une méthodologie d'évaluation de la performance énergétique portée par ces contrats (chapitre 2). A l'aide de cette méthodologie, nous avons pu analyser l'efficacité énergétique portée par les contrats de services énergétiques classiques.

Nous présentons ensuite des contrats de services énergétiques existants dont la structure est orientée vers l'amélioration de la performance énergétique des installations et en particulier le concept du contrat de performance énergétique. Enfin, en présentant deux études de cas concernant des offres de services énergétiques existantes, nous mettrons en évidence la différence entre un contrat de services énergétiques classique et un contrat de performance énergétique (chapitre 3).

Chapitre 1

Les services énergétiques : des prestations autour de la fourniture d'énergie

Le secteur des énergies de réseau (électricité et gaz) repose sur quatre activités principales distinctes : la production, le transport, la distribution et la fourniture. La production regroupe les activités d'extraction de matières premières (pétrole, gaz, charbon, minerais d'uranium) et les activités de transformation de ces matières premières en énergie primaire puis en énergie secondaire, comme par exemple la transformation du pétrole (matière première) en fioul (énergie primaire) puis en électricité (énergie secondaire) dans une centrale thermique de production d'électricité. Le transport est l'activité qui permet l'acheminement de grandes quantités d'énergies secondaires vers les zones de consommation. Lors du transport, les caractéristiques physiques des énergies secondaires (tension, pression) sont adaptées au transport sur grande distance et en grande quantité. Aussi, ces caractéristiques sont modifiées localement afin d'obtenir des énergies propres à la consommation, distribuable aux consommateurs finals. La distribution est l'activité qui permet ensuite de transporter les énergies secondaires « consommables » depuis le réseau de transport jusqu'au lieu de consommation. Enfin, la fourniture comprend les activités liées à la commercialisation de ces énergies finales.

Il faut également noter que d'autres énergies que les énergies de réseau sont également distribuées et fournies aux consommateurs. On pourra notamment citer le fioul qui est encore largement utilisé pour le chauffage des bâtiments ou l'approvisionnement de groupes électrogènes, mais également le bois, combustible traditionnel relancé ces dernières années par les pouvoirs publics. Enfin, il paraît également inévitable de ne pas mentionner les énergies renouvelables, et en premier lieu l'énergie solaire, qui, à défaut d'être à proprement parler distribuées, sont néanmoins des énergies finales disponibles à la consommation.

Ces énergies sont ensuite transformées en énergie utile pour les consommateurs. En effet, comme cela est représenté sur la figure 1.1, l'électricité, le gaz distribués ou encore le fioul, sont des vecteurs énergétiques qui seront transformés par des installations techniques (chaudières, groupes de production d'eau glacée) pour délivrer les énergies utiles dont les consommateurs feront usage pour répondre à leurs besoins finals (chauffage, cli-

matiation, éclairage, etc.). Les prestations techniques accompagnant la production et la fourniture d'énergie utile puis sa distribution et son exploitation pour les usages finals des consommateurs sont communément appelées « services énergétiques ». Ces prestations peuvent être prises en charge par les consommateurs eux-mêmes, mais sont bien souvent externalisées et confiées à un prestataire extérieur par l'intermédiaire d'un contrat de services énergétiques. Ces contrats prennent en charge toute ou partie des prestations nécessaires à l'exploitation des installations et prennent par conséquent des formes variées.

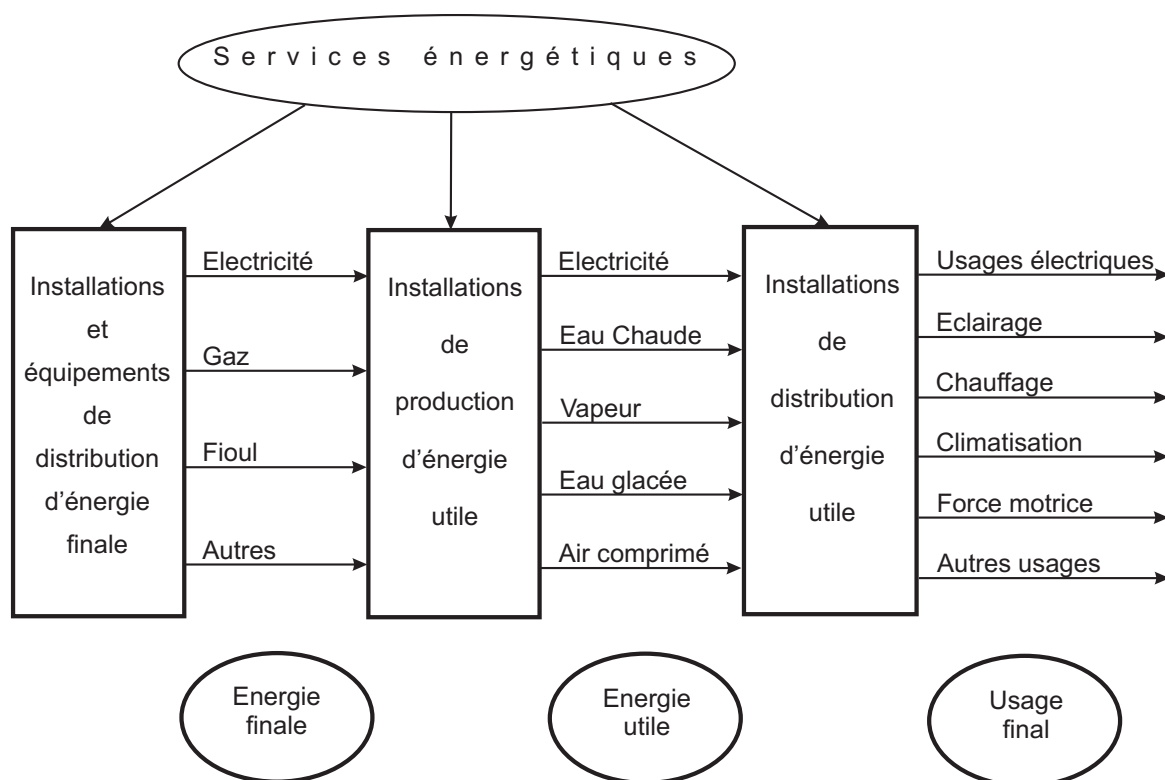


FIG. 1.1 – De la distribution des énergies à leur usage final.

Afin d'analyser la performance de ces contrats et notamment évaluer leur contenu en efficacité énergétique, nous allons proposer une typologie des contrats de services énergétiques et tenter de mettre en relation cette typologie avec leur contenu en efficacité énergétique.

1.1 Typologie d'un contrat de services énergétiques

1.1.1 Prestations élémentaires

Les offres des prestataires de services énergétiques sont composées d'une combinaison de prestations techniques élémentaires que nous décrivons dans ce qui suit. La plupart de ces prestations interviennent lors des phases de construction ou de rénovation des installations et lors de la phase d'exploitation des installations (figure 1.2).

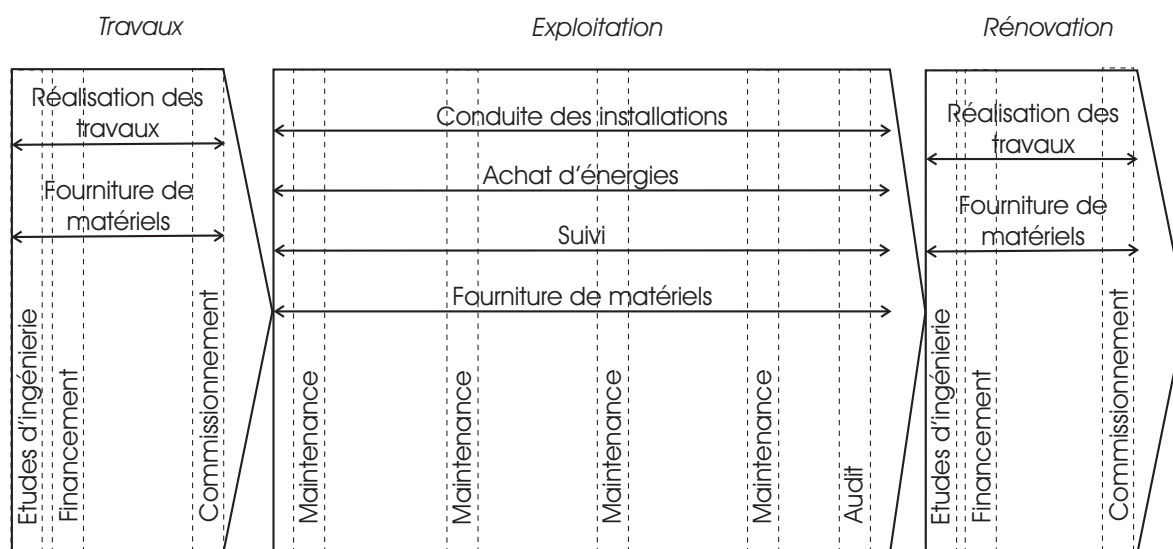


FIG. 1.2 – Les prestations des services énergétiques dans le cycle de vie des installations de transformation d'énergie finale.

Réalisation d'études d'ingénierie : les études d'ingénierie comprennent les prestations relatives à la conception des installations (dimensionnement et spécification des équipements techniques) et se traduisent généralement par la rédaction des documents techniques (cahier des charges, descriptifs des équipements et de travaux) nécessaires à la réalisation de travaux pour la construction ou la rénovation des installations.

Réalisation d'audits techniques : de manière générale, un audit est un processus systématique d'une installation ou d'une organisation permettant de collecter des données objectives pour vérifier la conformité de l'objet audité aux référentiels du domaine concerné. Dans le domaine de la fourniture d'énergie et de son utilisation pour le fonctionnement d'installations techniques, les audits concernent principalement la description des installations et de leurs conditions de fonctionnement en regard des normes de sécurité, de qualité et de performance existantes. On distingue cependant l'audit appelé « audit énergétique »¹ dont l'objectif est de reconstituer les consommations d'énergie d'une installation ou d'un bâtiment puis de formuler des propositions d'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette démarche est généralement un préalable à la réalisation de travaux

¹ « audit énergétique » est le terme le plus communément employé mais de nombreuses appellations coexistent. Ainsi, cette prestation pourra être présentée sous l'appellation « diagnostic énergétique », « diagnostic thermique » ou encore « expertise des consommations ».

d'amélioration, et nous verrons dans quelle mesure cette prestation est fondamentale en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Réalisation ou conduite de travaux : selon ses compétences techniques, le prestataire de service peut prendre en charge la réalisation de travaux ou en assurer la maîtrise d'œuvre.

Fourniture de matériel : cette prestation prend naturellement sa place lors de la réalisation de travaux de construction ou de rénovation et consiste à fournir les équipements spécifiés dans le cahier des charges rédigé lors de la conception de l'installation.

Commissionnement (ou « Commissionning ») : le commissionnement désigne l'ensemble des opérations nécessaires au démarrage des installations après construction ou rénovation afin que les équipements atteignent les performances prévues lors de leur spécification durant la phase de conception de l'installation. Cela peut également comprendre des prestations de formation des personnels appelés à prendre en charge la maintenance ou la conduite des installations lors de la phase d'exploitation.

Maintenance des équipements : la maintenance des équipements techniques désigne l'ensemble des actions et des moyens permettant de maintenir ou de rétablir les performances des installations en phase d'exploitation. Comme nous le verrons un peu plus loin, on peut distinguer la maintenance préventive, qui garantit le déploiement des moyens permettant d'anticiper la dégradation des performances des installations ou leurs pannes, de la maintenance corrective qui comprend également des opérations de dépannage ou de remplacement de matériel afin de pallier les pannes ou de remettre à niveau les performances des installations.

Conduite des installations : la conduite d'une installation consiste à piloter l'installation afin d'en assurer le fonctionnement prévu lors de la phase de conception. Là encore, on peut observer une grande disparité dans les moyens mis en œuvre pour assurer une prestation de conduite : de la conduite manuelle des installations à la conduite automatisée, du simple démarrage des différents éléments d'une installation au quotidien à la recherche systématique de stratégies de conduites optimisées. Nous verrons que la conduite des installations peut prendre des formes bien différentes d'un site à un autre ou d'un prestataire à un autre.

Suivi des installations : le suivi des installations désigne l'ensemble de moyens et des actions permettant de rendre compte de l'état de fonctionnement des installations : matériels de mesure, méthodologie d'évaluation des performances, communication des informations, etc.. Cette prestation a de toute évidence des liens directs avec deux des prestations précédemment décrites : la maintenance et la conduite.

Achat d'énergie : cette prestation est intrinsèquement liée à la fourniture d'énergie. Elle intègre l'achat des énergies nécessaires au fonctionnement des installations selon des caractéristiques préalablement fixées (qualité, sécurité d'approvisionnement, origine de l'énergie, etc.). Cette prestation est naturellement accompagnée des moyens nécessaires au

suivi et à la gestion des factures énergétiques, notamment dans le cas d'un consommateur « multi-sites » et/ou « multi-énergies ».

Financement : certains prestataires peuvent proposer des modes de financement des investissements pour la construction ou la rénovation des installations comme la location avec option d'achat par exemple. Il peut s'agir de prestataires traditionnels de services énergétiques (fournisseurs d'énergie ou de matériel par exemple) mais également de prestataires spécialisés provenant du secteur bancaire et que l'on nomme couramment « tiers ». On parle alors de « financement par tiers ». Les mécanismes de financement par tiers représentent des leviers intéressants pour l'amélioration de l'efficacité énergétique, qui seront abordés plus loin dans ce document.

Ces prestations peuvent être qualifiées de **prestations élémentaires**, dans la mesure où un contrat de service énergétique comprendra au minimum l'une de ces prestations et la plupart du temps sera constitué d'une combinaison de ces prestations. La première dimension permettant de différencier les contrats de services énergétiques est donc leur « **contenu technique** » qui ne désigne rien d'autre que la combinaison des prestations élémentaires qui sont prises en charge par le titulaire du contrat. Nous mettrons en évidence dans le chapitre 2 que le contenu d'un contrat de services énergétiques a une forte influence sur l'efficacité énergétique portée par ce contrat. De la même façon, nous verrons que le fait qu'une même combinaison de prestations soit portée par un ou plusieurs prestataires a de fortes répercussions sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements pris en charge (cf. exemple de la figure 1.3).

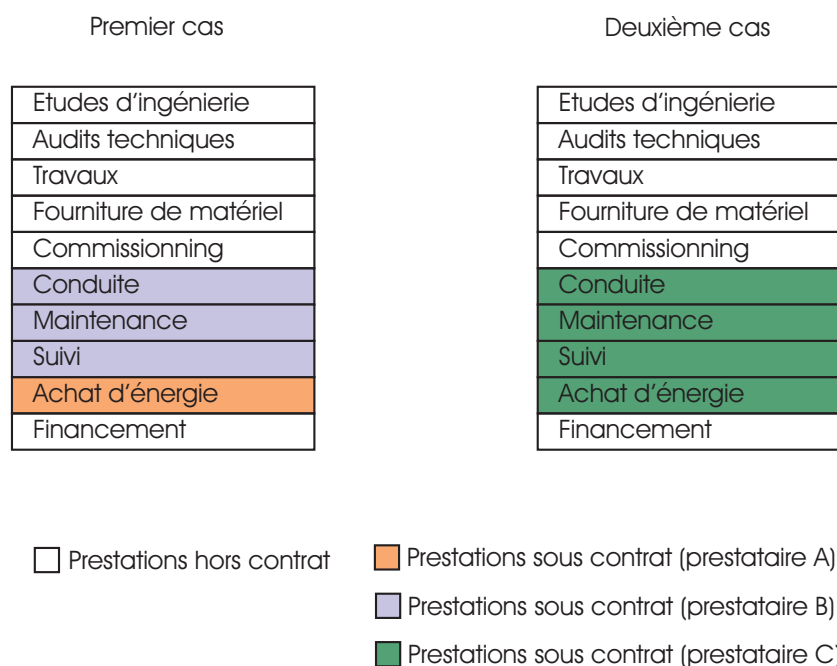


FIG. 1.3 – Contenu des contrats de services énergétiques : deux cas de contractualisation différents pour une même combinaison de prestations techniques.

Nous montrerons également, en prenant des exemples concrets de services énergétiques, dans quelle mesure la prise en charge par un même prestataire d'une combinaison de prestations peut apporter un certain degré de performance énergétique dans le fonctionnement des installations.

1.1.2 Portée d'un contrat de services énergétiques

Si le terme « contenu technique » permet de désigner l'ensemble des prestations techniques couvertes par un contrat de services énergétiques, il ne permet pas de représenter toutes les dimensions de ce contrat. En effet, il faut également prendre en considération la « portée » de ce contrat, c'est-à-dire la quantité et le type d'installations techniques prises en charge dans le but de produire et de fournir un usage final. Le terme de « portée » s'appréhende d'autant mieux si l'on met en rapport le nombre d'équipements techniques pris en charge, avec la longueur de la chaîne de transformation de l'énergie correspondante, comme nous pouvons le constater sur la figure 1.4 en prenant l'exemple des installations de chauffage.

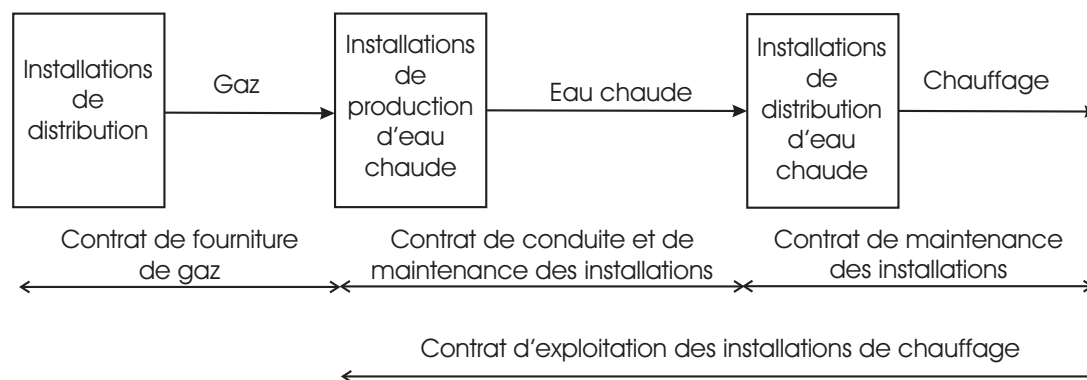


FIG. 1.4 – Portée de différents contrats de services énergétiques.

D'un point de vue économique, l'augmentation de la portée d'un contrat de service, et par conséquent la diminution du nombre de contrats portant sur l'installation, revient à intégrer verticalement les différentes activités nécessaires à la fourniture d'un usage final. Ceci se traduit naturellement par une baisse globale des coûts de transaction², et de façon plus générale par des économies d'échelle certaines. Cette intégration verticale des prestations sur une chaîne de transformation d'un bien, en l'occurrence ici l'énergie, s'accompagne également de la suppression de la double marginalisation sur le prix des biens intermédiaires, ici l'énergie finale et l'énergie utile.

Par conséquent, l'augmentation de la portée des contrats de services énergétiques s'accompagne a priori d'une réduction des coûts de production de l'énergie utile ou de la fourniture de l'usage final. De plus, cela permet au prestataire d'exercer un contrôle plus important sur la chaîne de transformation de l'énergie, et donc de maîtriser davantage les

²La notion de coûts de transaction a été introduite par Coase (1937) puis formalisée par Williamson (1985), et désigne l'ensemble des coûts inhérents aux transactions de biens et de services : recherche d'informations, prise de décision, négociation, suivi et exécution des transactions.

aléas de fourniture des services et les risques associés. En retour, d'un point de vue contractuel, le prestataire devra assumer les conséquences des risques qu'il prend en charge.

1.1.3 Modalités et conditions de rémunération d'un contrat de services

Une fois que la portée et le contenu d'un contrat de services énergétiques ont été définis, il reste à en caractériser les modalités de rémunération, c'est-à-dire la méthode, définie contractuellement, qui détermine le prix que le client verse au prestataire, ainsi que le type de garantie inscrite dans le contrat et qui conditionne le versement effectif de la rémunération.

Classiquement, on distingue deux formes de prix :

- les **prix unitaires**, dont le montant dépend des quantités fournies ou consommées pour la fourniture des prestations,
- les **prix forfaitaires**, dont le montant est indépendant des quantités fournies ou consommées pour la fourniture des prestations.

A priori, le montant de ces prix est défini lors de la mise en place du contrat. Mais il est tout à fait envisageable de mettre en place des mécanismes de révision des prix afin de tenir compte de l'évolution des paramètres qui ont une influence sur la structure de ces prix. On peut, par exemple, citer la possibilité de réviser ces prix en fonction d'indices représentant la variation des indices de conjoncture publiés par l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) ³. Ainsi, le prix d'un contrat de services énergétiques pourra être forfaitaire, ou unitaire, et, par exemple, indexé sur l'indice de prix des énergies et des matières premières ou sur l'indice du coût de la construction.

Par ailleurs, on pourra remarquer que, d'une part, chaque prestation n'accepte pas indifféremment ces deux types de rémunération, et que d'autre part, la nature des prestations peut conduire à choisir naturellement le type de rémunération. A titre d'exemple, l'achat d'énergie, sous réserve que les équipements nécessaires à leur comptage existent et fonctionnent, est plus naturellement rémunéré par des prix unitaires ramenés à l'unité d'énergie consommée : kilowattheure d'électricité, kilowattheure PCS⁴ de gaz, litre de fioul, ou encore le kilogramme de GPL⁵. Inversement, il est parfois difficile ou discutable de rémunérer certaines prestations avec un prix unitaire. On peut en particulier penser à la prestation de conduite des installations, dont il s'avère difficile de discrétiser le contenu.

De la même manière que pour les prix, on distingue deux types de garanties conditionnant le versement des rémunérations :

- **la garantie de moyens** : le prestataire s'engage sur la quantité et la qualité des moyens (main d'œuvre, matériel) à mettre en place pour la réalisation des prestations.
- **la garantie de résultat** : le prestataire s'engage sur les résultats attendus des prestations qu'il fournit.

³voir la liste des indicateurs INSEE sur [http ://www.insee.fr/fr/indicateur/conjoncture.asp](http://www.insee.fr/fr/indicateur/conjoncture.asp)

⁴Pouvoir Calorifique Supérieur

⁵Gaz de Pétrole Liquéfié

Dans les deux cas, la contractualisation de ces garanties doit s'accompagner de la mise en place d'indicateurs permettant de valider que le prestataire a bien fourni les moyens prévus ou a bien atteint les résultats attendus dans le contrat. En principe, ces indicateurs sont des valeurs-seuils qui sont définies dans le contrat et acceptées par les parties prenantes du contrat, et qui doivent être au minimum atteintes pour activer le versement de la rémunération du contrat.

Enfin, étant donné que le déclenchement de la rémunération du contrat est lié au franchissement de valeurs-seuils, le contrat fixe en retour le montant des pénalités qui seront imputées au prestataire dans le cas où manifestement ces seuils ne seraient pas atteints. Il est courant dans ce cas que le montant des pénalités soit une fonction de l'écart entre les valeurs-cibles définies contractuellement et les valeurs réellement atteintes.

1.2 Exemples de services énergétiques : les marchés d'exploitation des installations de chauffage

Afin d'illustrer la typologie que nous venons de décrire, nous allons caractériser quelques contrats de services énergétiques dont la structure a été stabilisée sous l'impulsion des pouvoirs publics français et qui sont mis en place lors de l'attribution de marchés publics d'exploitation des installations de chauffage.

Dans le but d'harmoniser et de coordonner les méthodes de passation de commande publique, l'Observatoire Économique de l'Achat Public⁶ par l'intermédiaire des Groupes d'Étude des Marchés (GEM), formule des recommandations et édite des ouvrages-cadres pour la rédaction des dossiers administratifs et techniques relatifs à l'attribution de marchés publics. Ainsi, le Groupe d'Étude des Marchés de Chauffage et de Climatisation (GEM/CC) a publié un guide contenant des recommandations pour la rédaction des cahiers des clauses techniques et administratives des marchés d'exploitation des installations de chauffage [GEM/CC, 2007]. Parmi ces recommandations, on y trouve la description de la structure des différents types de contrats de services énergétiques pour l'exploitation des installations de chauffage autorisés par les marchés publics.

1.2.1 Portée et contenu des contrats d'exploitation des installations de chauffage

Tous ces contrats d'exploitation des installations de chauffage sont structurés autour des prestations « maintenance », « conduite » et « suivi » et portent sur les installations de production et de distribution d'eau chaude pour le chauffage de locaux. La production et la distribution d'eau chaude sanitaire fait également couramment partie de la portée de ces contrats de services énergétiques. Cependant, la prestation de maintenance présente deux niveaux :

- « petit entretien » : il s'agit d'une prestation de maintenance préventive et comprend donc l'entretien courant, la surveillance et le réglage des différents matériels.

⁶L'Observatoire Économique de l'Achat Public a été créé le 10 novembre 2005 et placé sous la tutelle de la Direction des Affaires Juridiques du Ministère en charge de l'économie.

- « gros entretien et renouvellement » : il s’agit d’une prestation de maintenance corrective. Elle comprend donc les travaux d’entretien, de remplacement ou de renouvellement nécessaire au maintien des installations en bon état de fonctionnement pendant toute la durée du contrat.

Le contenu de base d’un contrat d’exploitation des installations de chauffage est donc constitué de la combinaison des prestations : « conduite », « maintenance préventive » et « suivi ». Dans le cadre des marchés publics, cette combinaison de prestations est présentée comme un lot unique et couramment désignée par le terme « P2 »⁷.

Dans le cadre des marchés d’exploitation des installations de chauffage, la prestation « maintenance corrective » est associée à la prestation « fourniture de matériels » et est désignée par l’appellation « Garantie Totale », ce qui charge le prestataire de fournir et d’installer les équipements nécessaires au maintien des installations en bon état de fonctionnement. Cette combinaison de prestations est couramment désignée par le terme « P3 » dans le cadre des marchés publics.

Autour de ces prestations vient s’ajouter une sixième prestation : l’achat d’énergie. Le titulaire du marché prend alors à son compte l’approvisionnement en quantité et en qualité requises pour la fourniture du chauffage des locaux concernés par le marché. Cette prestation constitue un lot unique et de la même façon que les autres lots est désignée par le terme générique « P1 ».

Ainsi, les trois lots techniques, désignés couramment P1, P2 et P3 couvrent en réalité six prestations au sens de la typologie que nous avons mise en place (figure 1.5).

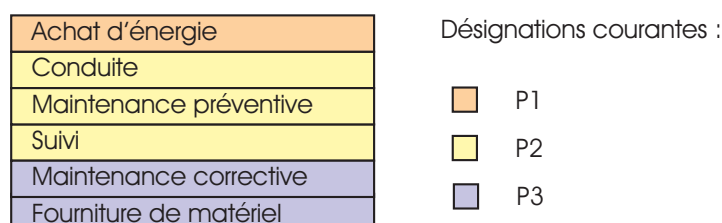


FIG. 1.5 – Contenu des contrats de services énergétiques issus de l’attribution de marchés publics d’exploitation des installations de chauffage.

Notons également que, comme le contrat porte sur l’ensemble des installations nécessaires à la transformation de l’énergie pour l’usage de chauffage, ces prestations sont assurées sur les installations de production et de distribution, dénommées respectivement « installations de production d’énergie utile » et « installations de distribution d’énergie utile » sur la figure 1.6. Sur cette même figure, nous mettons en évidence la portée des contrats de chauffage parmi l’ensemble des équipements de production et de distribution d’énergie d’un site, ainsi que les flux énergétiques concernés par ces contrats.

⁷Dans le cadre des marchés publics, chaque lot constitutif d’un appel d’offre est associé à un prix de règlement, et réciproquement. C’est pourquoi on assimile couramment le prix et le lot comme une entité unique et que, par abus de langage, on utilise le terme P (comme « Prix ») pour désigner un ensemble de prestations techniques.

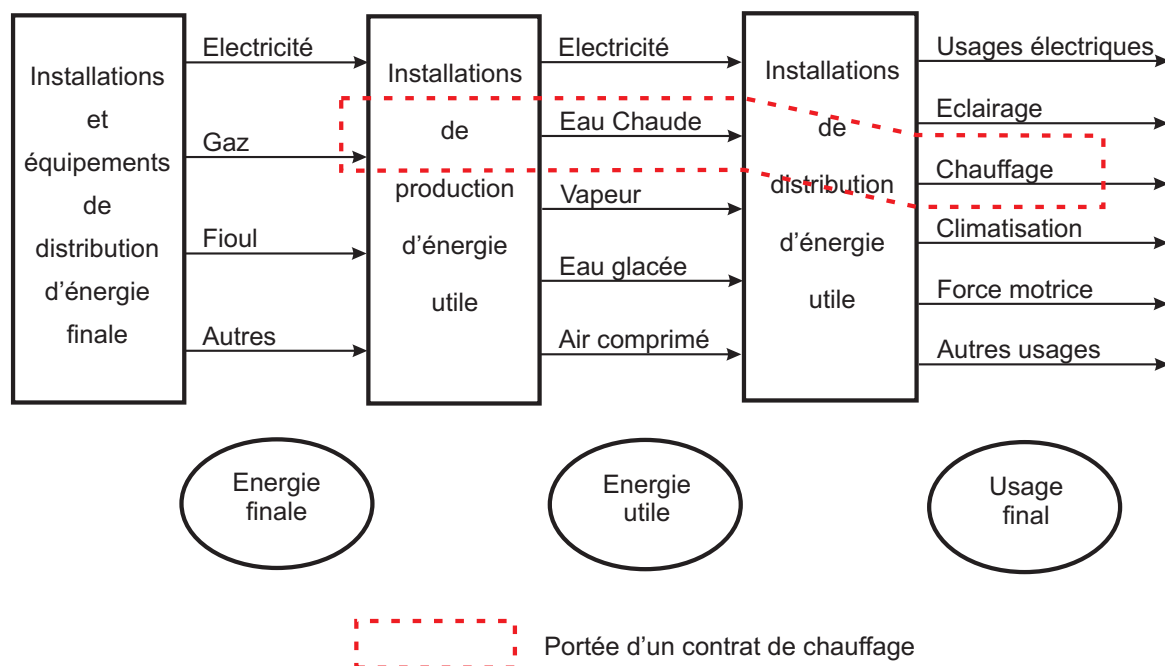


FIG. 1.6 – Portée d'un contrat de chauffage (exemple).

Enfin, nous pouvons représenter la portée et le contenu d'un contrat de chauffage en précisant, pour chaque niveau d'équipement, les prestations contenue dans un contrat. Ainsi, nous représentons, sur la figure 1.7, le contenu et la portée d'un contrat typique des marchés publics, désigné « Marché d'exploitation des installations de chauffage, P1 + P2 ».

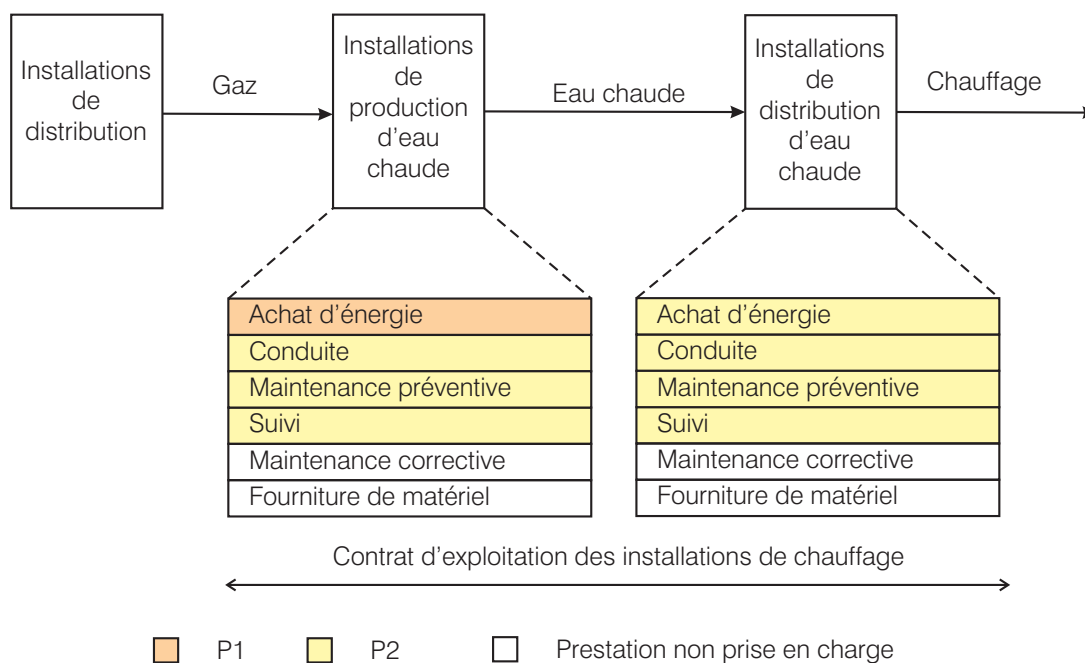


FIG. 1.7 – Portée et contenu d'un contrat de chauffage typique des marchés publics : « Marché d'exploitation des installations de chauffage, P1 + P2 ».

Dans notre exemple, le site concerné par ce contrat est alimenté par de l'eau chaude produite par une chaudière à gaz. On remarquera ainsi que la prestation « achat d'énergie », désignée P1 par les marchés publics, ne porte que sur l'achat d'énergie pour les installations de production d'énergie utile. Cette prestation pour les installations de distribution d'énergie utile est naturellement confondue avec la prestation désignée P2 lorsque la portée du contrat comprend les installations de production et de distribution.

1.2.2 Modalités de rémunération des contrats d'exploitation des installations de chauffage

Dans ce type de contrat de services énergétiques, le prestataire est soumis à une obligation de résultats, et doit notamment assurer le chauffage des locaux dans les conditions techniques prévues par le cahier des charges. Ce cahier des charges spécifie les résultats contractuels à atteindre comme, par exemple, les températures intérieures des locaux des différents régimes de chauffage (repos, inoccupation, nominal), les périodes des différents régimes de chauffage ainsi que les dispositions nécessaires à la vérification des résultats atteints (mesure des températures intérieures).

Ce cahier des charges spécifie également les conditions de rémunération du titulaire du contrat. Comme dans tout marché public, chaque lot est rémunéré indépendamment : les prix P1, P2 et P3 sont donc indépendants les uns des autres. Les contrats d'exploitation des installations de chauffage passés dans le cadre des marchés publics imposent que les lots P2 (conduite, maintenance préventive et suivi) et P3 (maintenance corrective et fourniture de matériel) soient rémunérés par des prix forfaitaires [GEM/CC, 2007].

En revanche, l'approvisionnement en énergie peut être rémunéré par des prix forfaitaires ou unitaires. C'est cette caractéristique qui différencie les différents types de marchés d'exploitation d'installations de chauffage qui existent à l'heure actuelle et dont le contenu comprend la prestation « approvisionnement en énergie ». La dénomination de ces différents types de marchés est donnée dans le tableau 1.1.

Désignation	Nom	Modalité de rémunération
PF	Prestation Forfait	Pas de prestation « Approvisionnement en énergie »
MF	Marché Forfait	Prix forfaitaire
MT	Marché Température	Prix forfaitaire ajusté selon la température extérieure
MC	Marché Comptage	Prix unitaire, à l'unité d'énergie utile consommée par le client
CP	Combustible Prestation	Prix unitaire, à l'unité d'énergie finale consommée pour le fonctionnement de l'installation

TAB. 1.1 – Désignation des marchés d'exploitation des installations de chauffage selon le type de rémunération de la prestation « approvisionnement en énergie ».

Nous pouvons constater que l'on retrouve, dans les contrats d'exploitation des installations de chauffage, les deux types de rémunération identifiés dans la partie 1.1.3.

1.2.3 Rémunération par prix forfaitaire : méthode de révision des prix

Comme nous l'avons vu, avec ce type de rémunération, le prestataire est rémunéré d'un montant fixe versé mensuellement qui est déterminé lors de la mise en place du contrat et pour toute la durée du contrat, mais qui peut faire l'objet de révision selon l'évolution de certains paramètres. Dans le cadre des marchés d'exploitation des installations de chauffage, les prix peuvent être révisés selon des indices économiques (coût de la main d'œuvre, prix des énergies) mais également en fonction de la rigueur du climat, l'objectif étant d'adapter la rémunération du contrat aux besoins réels.

Ces besoins de chauffage sont, en première approche, supposés directement proportionnels à la différence entre la température de consigne à l'intérieur des locaux et la température de l'air extérieur. Une simplification supplémentaire est apportée en prenant en compte des besoins journaliers moyens calculés à partir de la différence entre la température de consigne de chauffage et la valeur moyenne de la température de l'air extérieur sur une journée. Par suite, l'indicateur utilisé et permettant de représenter contractuellement la variation de la rigueur du climat est la quantité de degrés-jours sur la période de chauffage.

On entend par degrés-jours (DJ) de base X , la valeur moyenne sur une journée de l'écart positif entre la température moyenne et la température de base de valeur X . Les degrés-jours de base X sont notés DJX et sont exprimés en degrés Celsius.jours ($^{\circ}\text{C.jour}$). On désigne par $NDJX$ le nombre total de degrés-jours de base X relatifs à une station météorologique donnée, calculé sur une période annuelle de chauffage, contractuelle ou effective.

La méthode de révision des prix est proche de la méthode simplifiée des consommations de chauffage d'un bâtiment de l'AICVF [AICVF, 2000]. Avec cette méthode simplifiée, les consommations de chauffage C_{ch} (en $[kWh/an]$) sont déterminées de la manière suivante :

$$C_{ch} = \frac{24.i.NDJX.(DP + DR).(1 - F)}{1000.R_{ch}} \quad (1.1)$$

avec :

- i [-] : le facteur représentant les intermittences de fonctionnement de l'installation ;
- DP [W/K] : les déperditions moyennes liées à l'enveloppe du local chauffé (par degré d'écart) ;
- DR [W/K] : les déperditions moyennes liées au renouvellement d'air du local chauffé (par degré d'écart) ;
- F [-] : le facteur de couverture des besoins par les apports gratuits ;
- R_{ch} [-] : le rendement moyen annuel de l'installation sur la période de fonctionnement ;
- $NDJX$ [$^{\circ}\text{C.jour}$] : le nombre de degrés-jours en base X , correspondant à la température de non-chauffage du local considéré.

En supposant que l’enveloppe et l’usage du bâtiment d’une part, et la conduite et le rendement de l’installation d’autre part, restent inchangés d’une saison de chauffage à l’autre, on peut considérer que les consommations de chauffage sont directement proportionnelles aux degrés-jours. La révision des prix forfaitaires selon le climat consiste donc à déterminer a posteriori une consommation de chauffage corrigée $C_{ch}^{corrigée}$ à partir de la connaissance des degrés-jours de la saison de chauffe en cours pour une base donnée ($NDJX$), de la connaissance de la rigueur d’une saison de chauffe de référence ($NDJX^{référence}$) et de la consommation de chauffage correspondante ($C_{ch}^{référence}$), à l’aide de la relation :

$$C_{ch}^{corrigée} = C_{ch}^{référence} \frac{NDJX}{NDJX^{référence}} \quad (1.2)$$

Afin de limiter l’incertitude sur la détermination du nombre de degrés-jours, il est recommandé que ce calcul soit effectué sur la base des relevés d’une station météorologique de référence de Météo France.

Par ailleurs, à défaut de disposer de ces relevés, il est possible d’utiliser le nombre de degrés-jours unifiés, c’est-à-dire le nombre de degrés-jours en base $X = 18^\circ C$, qui est fourni par quelques organismes, comme le COSTIC⁸, recommandé dans le cadre des marchés publics. Le nombre de degrés-jours de base X est alors déduit du nombre de degrés-jours unifiés calculés pendant la même période par la formule : $NDJX = NDJU - n(18 - X)$ où n est le nombre de jours pour lesquels est réalisé le calcul. Cette méthode de changement de base suppose une variation linéaire du nombre de degrés-jours de base X avec l’écart entre cette base et $X = 18^\circ C$. Cette linéarité n’est pas vérifiée, et d’autres méthodes de changement de base existent [AICVF, 2000].

Cependant, c’est bien la méthode linéaire de changement de température de base qui est d’usage pour la mise en place de contrats d’exploitation des installations de chauffage dans le cadre des marchés publics [GEM/CC, 2007]. Il s’agit seulement d’une méthode contractuelle permettant d’ajuster simplement le nombre de degrés-jours unifiés à une base quelconque.

Enfin, afin de mettre en place cette révision du prix forfaitaire, il est nécessaire d’évaluer la consommation de chauffage de référence et d’obtenir le nombre de degrés-jours correspondants à cette consommation. Traditionnellement, on utilise les factures de chauffage des années passées pour évaluer cette consommation, tandis que le nombre de degrés-jours unifiés est disponible sur plusieurs décades. Dans le cas où ces factures ne sont pas disponibles, il est toujours possible d’utiliser la première année de contrat pour évaluer la consommation de chauffage de référence : la méthode des degrés-jours est suffisamment robuste pour être paramétrée mensuellement sur une seule saison de chauffe. Lorsque la température de non-chauffage est correctement déterminée, la méthode des degrés-jours permet d’estimer la consommation annuelle de chauffage de bâtiments à usage de logement avec une précision de l’ordre de 3 % [Fels, 1986]. Par suite, cette méthode a été étendue aux autres types de bâtiments, tels les immeubles de bureaux, pour l’indexation des contrats de chauffage.

⁸Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques

En conclusion, comme la méthode que nous venons d'exposer suppose que le nombre de degrés-jours est le seul paramètre influençant les besoins de chauffage, on pourra remarquer que mettre en place une rémunération au forfait corrigée du nombre de degrés-jours des consommations de chauffage revient, en quelque sorte, à mettre en place une rémunération des consommations de chauffage par prix unitaire ramené à l'unité de besoin de chauffage. Toutefois, cette approche suppose que les hypothèses⁹ nécessaires à la mise en place de la méthode des degrés-jours sont vérifiées.

Sous ces hypothèses, le climat restant le seul facteur influençant les consommations de chauffage, leur variation est hors de contrôle des parties prenantes. Or, aux yeux des pouvoirs publics, ceci constitue une raison nécessaire à la mise en place d'une rémunération forfaitaire révisable selon le nombre de degrés-jours. De plus, comme les degrés-jours sont fournis par des organisations indépendantes des parties prenantes d'un contrat d'exploitation d'une installation de chauffage, ils constituent un indice objectif pour la révision des prix forfaitaires. C'est pour cela que seule cette révision de la consommation d'énergie des installations de chauffage est autorisée dans le cadre des marchés publics.

1.2.4 Rémunération par prix unitaire

Dans le cas d'une rémunération par un prix unitaire, le contrat précise les conditions dans lesquelles s'effectue le comptage des unités consommées. Étant donné que les contrats d'exploitation des installations de chauffage ont une portée importante, depuis la distribution de l'énergie jusqu'à l'usage final, il est possible de mettre en place le comptage à différents stades de la chaîne de transformation de l'énergie et donc de fixer la rémunération du contrat sur les différents vecteurs énergétiques disponibles.

La rémunération du contrat peut donc être indexée :

- soit sur l'unité d'énergie finale consommée : gaz, électricité, fioul ;
- soit sur l'unité d'énergie utile consommée : kilowattheure ou calorie apporté par l'eau chaude.

Dans les deux cas, la détermination du prix unitaire est réalisée lors de la mise en place du contrat, et dans le cadre des marchés d'exploitation des installations de chauffage, ce prix unitaire est considéré comme lié uniquement au combustible. Ceci signifie donc que seuls des paramètres économiques influant sur le coût de la fourniture en énergie (comme l'indice INSEE du prix du gaz) peuvent éventuellement être intégrés dans les mécanismes de révision du prix. Tous les autres paramètres susceptibles de modifier la structure du prix du service rendu durant la phase d'exploitation, comme une modification du mode de conduite de l'installation par exemple, ne peuvent pas être pris en compte et ne peuvent pas conduire à une quelconque révision du prix unitaire une fois celui-ci établi contractuellement.

De plus, on peut montrer que la structure du prix qui rémunère l'approvisionnement en énergie sera différente d'un contrat à l'autre selon l'unité de rémunération choisie, quand bien même il s'agit de la même installation.

⁹Cette approche suppose que les usages, les apports internes, l'ensoleillement, la conduite des installations et le rendement global de l'installation sont invariants d'une année à l'autre.

Rémunération par prix unitaire de l'énergie finale consommée

Dans le cas d'une rémunération par prix unitaire de l'énergie finale consommée, le prix de l'approvisionnement de l'énergie est vraisemblablement très proche de celui du fournisseur d'énergie, car le prestataire ne subit que le surcoût dû aux coûts de transaction pour cet achat d'énergie finale (négociation des contrats de fourniture, gestion des factures, etc.). Par ailleurs, les coûts de la mise en place d'un système de comptage par le distributeur sont à la charge du fournisseur d'énergie en ce qui concerne les énergies de réseau (gaz et électricité). Bien que ces coûts soient intégrés dans le montant de la facture que le fournisseur présente au prestataire, le comptage des quantités d'énergie finale ne fait pas partie à proprement parler de la prestation « achat d'énergie ».

Ainsi, comme le montre la figure 1.8, la rémunération d'une prestation « achat d'énergie » pour le fonctionnement d'une installation de production d'eau chaude, par exemple, est indexée sur l'unité d'énergie de gaz consommée, c'est-à-dire en amont des installations de conversion d'énergie finale, hors du contrôle que le prestataire exerce sur les installations. On peut également remarquer sur cette figure que la prestation « achat d'énergie » pour les installations de distribution d'énergie utile (installation de distribution d'eau chaude) ne fait l'objet d'aucune rémunération. En effet, étant donné que le contrat porte sur l'ensemble des installations de production et de distribution, on peut considérer que la rémunération de cette prestation est interne à l'organisation mise en place pour la réalisation de ce contrat : elle est donc invisible pour le client, bien qu'elle se traduise par certains coûts de fonctionnement pour le prestataire. On peut alors supposer que ces coûts seront supportés par le prestataire dans le cadre de la prestation « conduite » des installations de distribution de l'énergie utile.

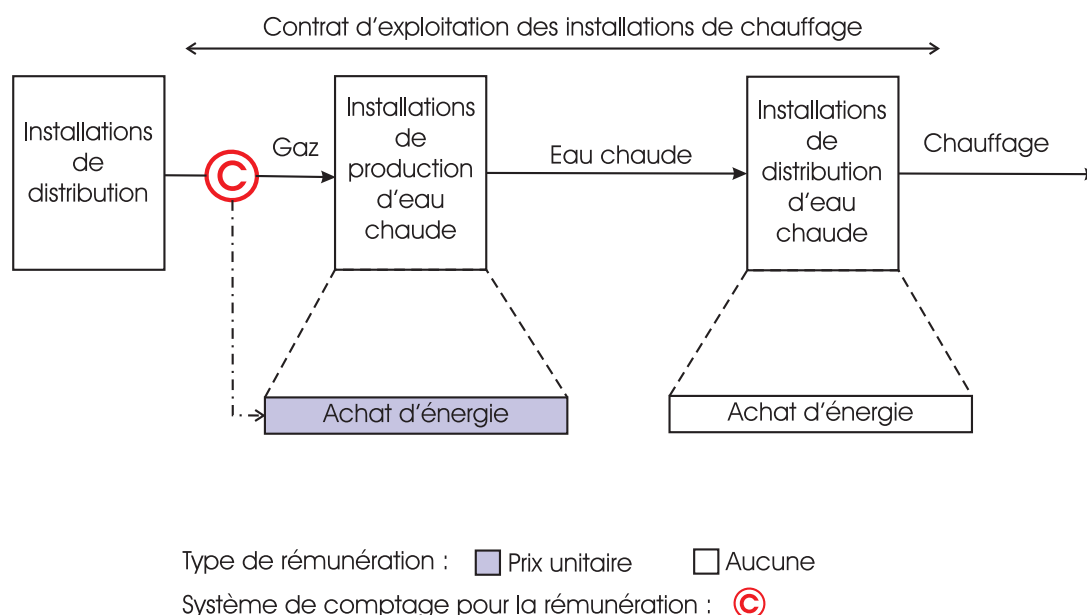


FIG. 1.8 – Marchés d'exploitation des installations de chauffage - 1^{er} cas : rémunération de la prestation « Approvisionnement en énergie » par prix unitaire de l'unité d'énergie finale consommée.

Rémunération par prix unitaire de l'énergie utile consommée

Dans le cas d'une rémunération par prix unitaire de l'énergie utile consommée, la rémunération de la prestation est indexée sur la quantité consommée d'un vecteur énergétique intermédiaire de la chaîne de transformation de l'énergie. Dans notre exemple, il s'agit de l'eau chaude (cf. figure 1.9) qui est le vecteur énergétique nécessaire à l'usage final du client. Comme le prestataire prend à sa charge l'achat de l'énergie nécessaire au fonctionnement des équipements de production d'énergie utile (ici, l'installation de production de chauffage), le prestataire subit les mêmes coûts de transaction pour la négociation et la gestion du contrat de fourniture que dans le cas précédent, mais il doit également prendre en charge la mise en place du système de comptage de l'énergie utile qui servira à facturer sa prestation au client.

De plus, l'élaboration du prix unitaire de l'énergie utile (eau chaude) vendue au client intègre a priori l'efficacité de conversion de ces équipements. Le prix unitaire qui détermine la rémunération de cette prestation a donc une structure nettement différente. Cependant, de la même manière que dans le cas précédent, seule la révision du prix unitaire de cette prestation à l'aide d'indices liés à l'énergie consommée en amont de l'installation, est autorisée car il s'agit d'indices objectifs et extérieurs à l'organisation nécessaire à la fourniture de l'usage chauffage.

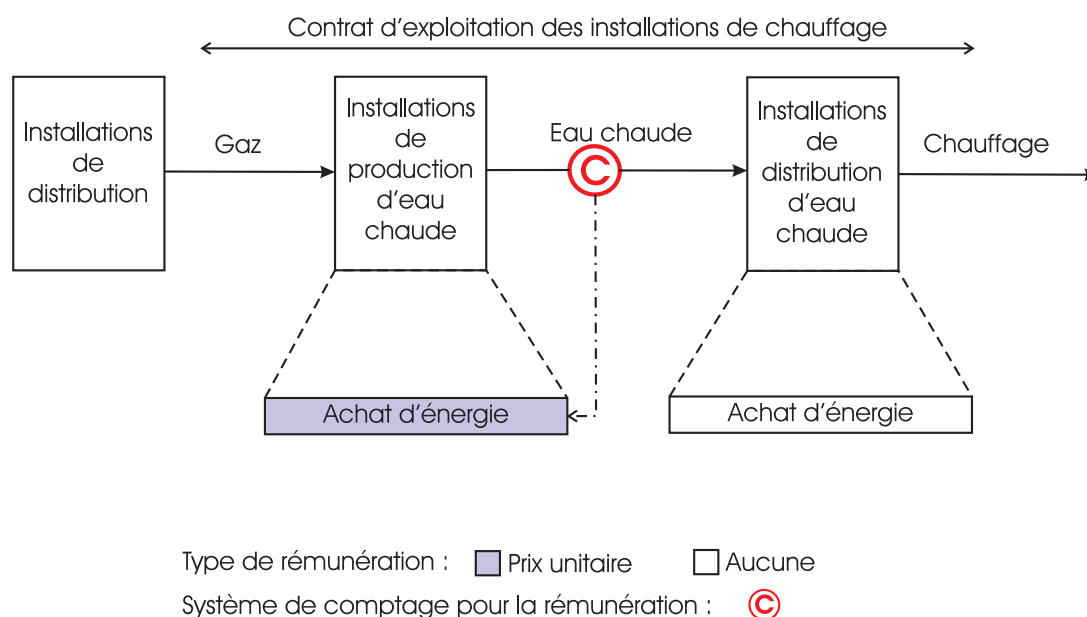


FIG. 1.9 – Marchés d'exploitation des installations de chauffage - 2^e cas : rémunération de la prestation « Achat d'énergie » par prix unitaire de l'unité d'énergie utile consommée.

1.2.5 Bilan : typologie des contrats d'exploitation des installations de chauffage

En résumé, la typologie que nous avons décrite dans cette partie nous permet de caractériser les contrats de services énergétiques mis en place dans le cadre de l'attribution des marchés d'exploitation des installations de chauffage, en prenant en compte trois dimensions de ces contrats :

- le contenu,
- la portée,
- les modalités de rémunération.

Comme nous l'avons vu, ces contrats portent sur les mêmes installations, et ne se distinguent que sur deux dimensions : leur contenu et les modalités de rémunération des prestations (cf. tableau 1.2).

La structure des marchés d'exploitation a été stabilisée sous forme de lots techniques par les pouvoirs publics afin d'assurer leur compatibilité avec les contraintes du code des marchés publics [CMP, 2006], mais cette structure a largement été reprise pour la passation de contrats de services énergétiques dans le secteur privé pour l'exploitation des installations de chauffage mais également pour les installations de production frigorifique, comme nous le détaillons dans la partie qui suit.

Désignation	Contenu des contrats	
	Conduite, maintenance suivi et fourniture de matériels	Achat d'énergie
PF	Prix forfaitaire	Ne s'applique pas
MF	Prix forfaitaire	Prix forfaitaire
MT	Prix forfaitaire	Prix forfaitaire ajusté selon la température extérieure
MC	Prix forfaitaire	Prix unitaire, à l'unité d'énergie utile
CP	Prix forfaitaire	Prix unitaire, à l'unité d'énergie finale

TAB. 1.2 – Typologie des marchés d'exploitation des installations de chauffage.

1.3 Les contrats de fourniture d'énergie frigorifique

De la même manière que pour les installations de chauffage, nous décrivons la structure des contrats classiques de fourniture d'énergie frigorifique. S'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de document formalisant les structures de ces contrats à la manière de ce que l'on a pu voir pour les installations de chauffage, la mise en place des contrats de fourniture d'énergie frigorifique est largement inspirée des contrats existants pour le chauffage, au point d'en reprendre les désignations utilisées dans les marchés publics.

1.3.1 Portée et contenu des contrats de fourniture d'énergie frigorifique

Ainsi, les contrats de fourniture d'énergie frigorifique sont structurés autour des prestations « conduite », « maintenance » et « suivi » et portent sur les installations de production et de distribution d'eau glacée pour la climatisation de locaux, la fourniture d'énergie frigorifique pour chambres froides ou de procédés industriels. On y retrouve également la différenciation des niveaux de maintenance (maintenance préventive ou corrective) et la fourniture de matériels.

La prestation « achat d'énergie » prend une position particulière dans les contrats de fourniture d'énergie frigorifique par rapport aux contrats de chauffage. En effet, la portée d'un contrat de chauffage s'étend classiquement sur toute la chaîne de transformation de l'énergie (dans le cas où l'eau chaude est produite à partir d'une chaudière à gaz, au fioul ou encore au bois) depuis la fourniture du combustible aux installations de distribution utile du chauffage. La consommation de gaz est donc généralement consacrée uniquement à la fourniture du chauffage, ce qui justifie que la prestation « achat d'énergie » fasse partie intégrante des contrats d'exploitation des installations de chauffage.

En revanche, dans le cadre de la fourniture d'énergie frigorifique, la fourniture d'électricité nécessaire au fonctionnement des groupes de production frigorifique¹⁰ sert aussi à la fourniture d'autres usages tels l'éclairage ou la bureautique. Il n'est donc pas rare que la distribution et la fourniture d'électricité soient exclues des contrats de fourniture d'énergie frigorifique, c'est-à-dire que le client reste le gestionnaire du contrat de fourniture d'électricité et que le prestataire prenne en charge l'installation en aval de la fourniture d'électricité (cf. figure 1.10).

¹⁰La production d'énergie frigorifique peut également être assurée au moyen de groupes frigorifiques à absorption fonctionnant à partir d'une source de chaleur fournie par une chaudière à gaz ou par un excès de chaleur non valorisée en sortie d'une turbine à vapeur par exemple. Cependant, ces groupes à absorption ne représentent qu'une très faible part du parc de groupes frigorifiques (moins de 1 % en nombre d'unités), en particulier en France. C'est la raison pour laquelle nous excluons ce type d'installations de nos propos, et ne prenons en considération que les groupes frigorifiques à compression fonctionnant à partir d'électricité.

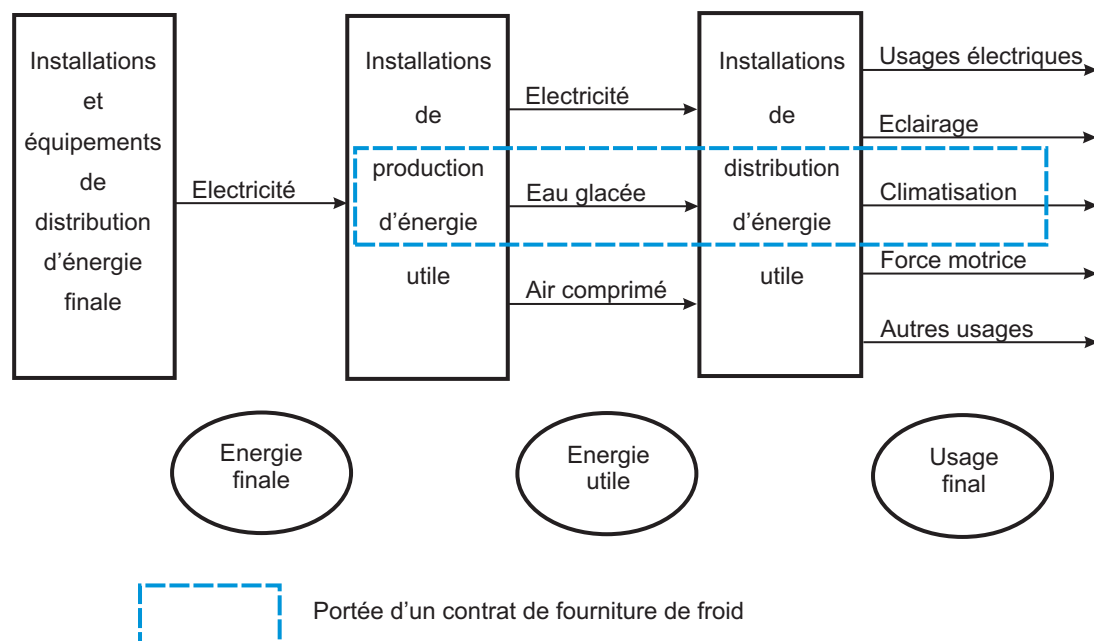


FIG. 1.10 – Contrat de fourniture de froid - 1^{er} cas : la fourniture de froid fait l'objet d'un contrat en aval de la fourniture d'électricité.

Dans le cas contraire, si le prestataire prend à son compte la fourniture d'électricité, le contrat mis en place s'étend à d'autres installations (cf. figure 1.11), car fondamentalement la fourniture d'électricité porte sur l'ensemble du site.

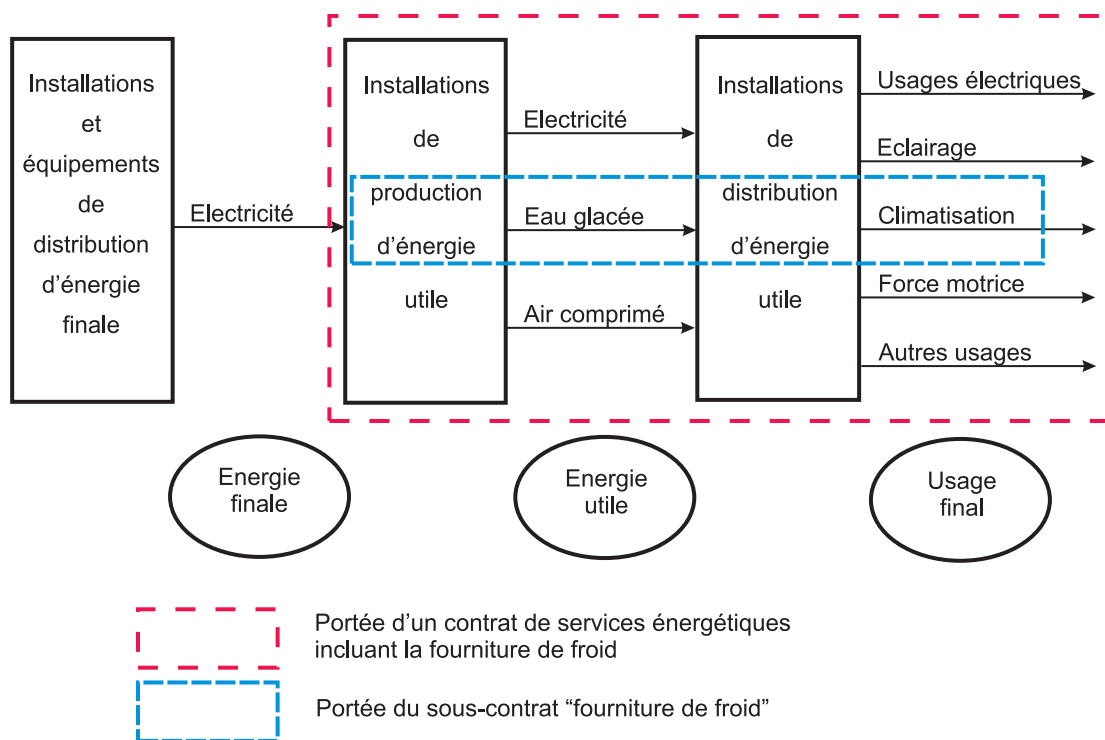


FIG. 1.11 – Contrat de fourniture de froid - 2^{ème} cas : la fourniture de froid est incluse dans un contrat « électricité » global.

Cette particularité a une importance fondamentale sur le type de modalités de rémunération présentes dans les contrats de fourniture de froid.

1.3.2 Modalités de rémunération des contrats de fourniture d'énergie frigorifique

Rémunération par prix forfaitaires

La méthode de rémunération au forfait fixe (type « Prestation Forfait ») telle qu'elle a été présentée pour les contrats de chauffage se retrouve dans les contrats de fourniture d'énergie frigorifique. De même, l'approvisionnement en énergie, en l'occurrence en électricité, lorsqu'il est pris en charge par le prestataire peut être rémunéré forfaitairement (marchés de type « Marché Forfait ») comme pour les contrats d'exploitation des installations de chauffage.

En revanche, il n'existe pas ou peu de contrats contenant des clauses de révision du montant forfaitaire en fonction du climat. En effet, au contraire des contrats de chauffage, les tentatives d'indexation des consommations d'énergie pour la fourniture de froid à l'aide du nombre de « degrés-jours climatisation » ou de « degrés-jours froid¹¹ » ne se sont pas montrées convaincantes. Bien que, dans certaines configurations, il soit possible d'observer de réelles corrélations entre la consommation d'énergie pour la fourniture de froid et le nombre de « degrés-jours froid », cette méthode ne semble pas constituer une méthode fiable pour l'indexation de contrat de services énergétiques relatifs à la fourniture d'énergie frigorifique. Dans certains cas, son biais peut devenir trop important ([Day, 2004]). C'est pour cela que des marchés de type « Marché Température » sont peu répandus dans les contrats de fourniture d'énergie frigorifique.

Cependant, nous observons régulièrement dans la littérature de nouvelles tentatives pour appliquer ce type de méthode, et nous verrons dans la suite de ce document, qu'il est envisageable, sous réserve de prendre quelques précautions, de mettre en place une méthode d'indexation de la rémunération des contrats de fourniture de froid par les « degrés-jours froid » .

Rémunération par prix unitaire

La mise en place d'une rémunération à l'unité d'énergie utile vendue ou d'énergie finale consommée suppose que l'on soit en mesure de comptabiliser les quantités d'énergie vendue ou consommée. De la même manière que pour l'eau chaude ou la vapeur qui alimentent un réseau de chauffage, il est possible de mettre en place des compteurs d'énergie en aval des installations de production d'eau glacée afin de comptabiliser les quantités d'énergie utile vendues au client. Ainsi, des modalités de rémunération par prix unitaire à l'unité d'énergie utile consommée par le client sont largement répandues dans les contrats de fourniture d'énergie frigorifique. Les contrats de type « Marché Comptage » constituent même le type de contrat de fourniture d'énergie frigorifique le plus répandu.

¹¹Les « degrés-jours froids » sont construits de manière similaire aux degrés-jours de chauffage : ils sont calculés comme la valeur moyenne de l'écart négatif entre la température moyenne de l'air extérieur et une température de base, appelée, dans ce cas-ci, température de non-refroidissement

En revanche, il n'existe pas à proprement parler de contrat d'exploitation des installations de production frigorifique avec rémunération par prix unitaire ramené à l'unité d'énergie consommée de type « Combustible Prestation ». Comme cela a déjà été décrit précédemment, l'énergie nécessaire au fonctionnement des groupes de production d'eau glacée est généralement l'électricité. Or, de manière générale, un site est fourni en électricité au moyen d'un unique contrat, et le comptage d'électricité consommée est effectué en amont des installations par l'intermédiaire du compteur électrique installé par le distributeur. De plus, le sous-comptage, c'est-à-dire la mise en place de compteurs intermédiaire en aval du compteur principal du distributeur, est quasiment inexistant. La réglementation impose la mise en place de dispositifs de suivi des consommations de refroidissement dans les bâtiments à usage autres que d'habitation d'une surface supérieure à 400 m^2 (cf. article 77 dans [Arrêté 24 mai 2006]) : cette obligation ne concerne donc que la comptabilité de l'énergie finale.

Dans ces conditions, il est impossible de comptabiliser l'énergie électrique consommée par la seule installation de production frigorifique. Il n'existe donc pas de contrat de fourniture d'énergie frigorifique dont le montant soit indexé sur le comptage de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des installations de production d'énergie frigorifique prises en charge par le prestataire.

En revanche, si le prestataire prend à son compte la fourniture d'électricité, il est possible de mettre en place une rémunération de type « Marché Comptage » sur l'approvisionnement en électricité, et de considérer la part de consommation des installations de production frigorifique comme une part forfaitaire de la facture globale d'électricité. Dans ce cas-là, le contrat mis en place n'est plus uniquement un contrat d'exploitation des installations frigorifiques, mais un contrat plus global de fourniture et de gestion de l'électricité dont la portée s'étend à d'autres installations et donc d'autres usages finals.

1.3.3 Bilan : typologie des contrats d'exploitation des installations de production d'énergie frigorifique

La prise en charge d'installations de production d'énergie frigorifique se distingue de la prise en charge des installations de chauffage par la nature de l'énergie utilisée par les groupes de production d'eau glacée. Étant donné que l'usage de l'électricité n'est pas réservé à un seul usage final, que les dispositifs de sous-comptages sont généralement absents et que les méthodes d'indexation de la consommation d'énergie frigorifique ne donnent pas satisfaction, la consommation propre à la production d'énergie frigorifique est rarement explicitée.

Ceci conduit donc les exploitants d'installations frigorifiques à proposer des contrats de fourniture d'énergie frigorifique dont la rémunération est :

- soit un montant fixe ;
- soit un forfait de la consommation globale du bâtiment ou du site concerné : dans ce cas-ci, la fourniture d'énergie frigorifique est comprise dans un contrat de portée plus large prenant en compte d'autres installations consommant également de l'électricité ;
- soit indexée sur la quantité d'eau glacée produite par les groupes de production

d'eau glacée.
 Les différents types de rémunération sont synthétisés dans le tableau 1.3.

Désignation	Contenu des contrats	
	Conduite, maintenance préventive et suivi	Achat d'énergie
PF	Prix forfaitaire	Ne s'applique pas
MF	Prix forfaitaire	Prix forfaitaire
MT	Ne s'applique pas	Prix forfaitaire
MC	Prix forfaitaire	Prix unitaire, à l'unité d'énergie utile
CP	Prix forfaitaire	Prix unitaire déterminé au forfait sur la facture globale d'électricité consommée

TAB. 1.3 – Typologie des marchés d'exploitation des installations de production d'énergie frigorifique.

Enfin, notons que les contrats de type « Marché Comptage » sont les plus répandus sur le marché de la fourniture d'énergie frigorifique.

Chapitre 2

Évaluation de l'efficacité énergétique portée par un contrat de services énergétiques

La typologie des contrats de services énergétiques exposée dans le chapitre précédent met en évidence la variété des structures de contrats de services énergétiques existants permettant de répondre au mieux aux besoins des consommateurs finals. La prise en charge des installations de production et de distribution de l'énergie par un prestataire externe au site consommateur s'accompagne naturellement d'un transfert des risques depuis le consommateur, qui gère lui-même ses installations, vers le prestataire de services. Parmi les différents risques inhérents à la gestion des installations de conversion d'énergie, nous nous intéressons plus particulièrement au risque de dérive des performances énergétiques qui se traduit par une augmentation des capacités et des volumes d'énergie consommés.

Le transfert de risque, qui accompagne la mise en place d'un contrat de services énergétiques, modifie sensiblement la stratégie de gestion des installations, et par conséquent la manière avec laquelle l'énergie nécessaire au fonctionnement des installations est gérée. Ainsi, la structure des contrats de services énergétiques et, en particulier, les modalités de rémunération de ces contrats, qui encadrent le transfert de risques, influencent fortement le contenu en efficacité énergétique des services énergétiques, c'est-à-dire le rapport entre l'usage final fourni dans le cadre du contrat et la quantité d'énergie nécessaire à la production de cet usage final.

Afin d'évaluer le contenu en efficacité énergétique des différentes structures de contrats de services énergétiques, nous allons reprendre à notre compte la méthode variationnelle d'analyse du contenu en efficacité énergétique exposée par [Dupont, 2006]. Après en avoir repris les principes, nous utiliserons cette méthode pour analyser l'influence des différentes structures mises en évidence dans le paragraphe 1.1, sur le contenu en efficacité énergétique des contrats de services énergétiques. Enfin, nous pousserons l'exercice en mettant en évidence les différences de contenu en efficacité énergétique dans les contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.

2.1 Influence de la structure des contrats de services énergétiques sur leur contenu en efficacité énergétique

2.1.1 Méthode d'évaluation du potentiel en efficacité énergétique d'un contrat de services énergétiques

Comme nous venons de l'indiquer, la mise en place d'un contrat de services énergétiques se traduit par le transfert des risques liés à l'exploitation des installations depuis l'utilisateur final vers le prestataire. Ce transfert est d'autant plus important que le prestataire garantit un résultat sur le service rendu, ce qui est très largement répandu dans les contrats de services énergétiques. Cette garantie de résultat se traduit par la définition de clauses contractuelles contraignantes financièrement pour le prestataire en cas de non-respect des objectifs de services définis lors de la mise en place du contrat. Il s'agit d'un risque financier classiquement encouru par le prestataire en cas de panne de l'installation, ou en cas de dérive par rapport aux objectifs définis contractuellement, qui a pour conséquence d'orienter le comportement de l'exploitant.

De même, le client supporte les risques inhérents à l'exploitation des installations qui restent sous son contrôle, et son comportement sera donc orienté de la même façon. Afin d'analyser l'efficacité énergétique contenue dans les contrats de services énergétiques, nous allons donc déterminer de quelle manière l'orientation des comportements des acteurs, due à la gestion des risques financiers, va dans le sens de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Pour cela, nous avons recours à la méthode variationnelle d'analyse proposée par [Dupont, 2006] et qui repose sur l'examen de deux variables :

- **la gestion des risques pris en charge par le prestataire** : cette méthode propose de commencer par identifier la nature de ces risques et leurs conséquences pour le prestataire puis d'analyser la manière avec laquelle le prestataire gère l'incertitude liée à ces risques. On examinera en particulier les risques de dérive des performances énergétiques des installations ;
- **les incitations à la maîtrise des consommations** : les modalités de rémunération fixent le montant que verse le client au prestataire en échange des services rendus. Ces modalités influent donc directement soit sur le coût supporté par le client, soit sur les bénéfices du prestataire et constituent une incitation, positive ou non, à la maîtrise des consommations d'énergie.

Nous allons donc examiner l'influence de ces deux variables sur le contenu en efficacité énergétique des contrats de services énergétiques, en fonction de leur structure.

2.1.2 Influence du contenu d'un contrat sur son potentiel en efficacité énergétique

Les prestations élémentaires décrites dans le chapitre 1 ont des potentiels en efficacité énergétique variés. De plus, si l'on considère certaines combinaisons de ces prestations élémentaires, nous pouvons mettre en évidence des interactions entre ces prestations, et leur influence sur le potentiel en efficacité énergétique des contrats de services énergétiques.

Potentiel d'efficacité énergétique des prestations élémentaires

Dans un premier temps, nous pouvons identifier trois types de prestations parmi les prestations élémentaires :

- 1^{er} type : les prestations dont le résultat n'influe pas ou n'est pas influencé par la performance des installations ;
- 2^{ème} type : les prestations dont le résultat influe directement sur la performance des installations ;
- 3^{ème} type : les prestations dont le résultat dépend de la performance de l'installation.

En effet, les résultats des études d'ingénierie, de l'audit et du suivi n'ont pas de conséquence directe sur la performance énergétique des installations. Il s'agit de prestations à caractère informatif ou prescriptif dont le but est de comprendre le fonctionnement des installations et du site, d'émettre des prescriptions sur les équipements à installer ou encore de formuler des recommandations sur la stratégie de gestion des installations. Mais en soi, *ces prestations, considérées isolément, n'ont pas d'effet concret direct sur la performance énergétique des installations.*

En revanche, *la réalisation de travaux, la fourniture de matériels et le commissionnement influent sur les performances énergétiques des installations.* En effet, le résultat de ces prestations conditionne le bon niveau de performance énergétique lors de la phase de construction et de démarrage des installations. Du résultat de ces prestations dépend la performance intrinsèque des installations.

De même, *la maintenance et la conduite des installations ont une influence directe et forte sur les performances énergétiques* tout au long de la vie de l'installation, car elles permettent de maintenir les performances dans le temps ou d'adapter le fonctionnement des installations aux conditions de fonctionnement réelles. La performance des installations durant la phase d'exploitation dépend du résultat de ces deux prestations.

Enfin, l'achat d'énergie est une prestation dont le résultat dépend naturellement directement de la performance énergétique des installations. C'est d'ailleurs cette prestation qui supporte principalement le risque lié à la dérive des performances et à la surconsommation d'énergie.

La prestation « financement » supporte également des risques liés à la performance énergétique des installations, mais de manière plus indirecte. En effet, une dégradation des performances énergétiques entraîne une augmentation des dépenses de fonctionnement. Ce surcoût, supporté bien souvent par le client, entame donc sa capacité d'auto-financement, et diminue de fait sa solvabilité auprès des établissements de crédit.

Comme résumé sur la figure 2.1, certaines prestations élémentaires, que nous venons d'identifier, ont des conséquences directes sur la performance énergétique des installations, tandis que d'autres sont, au contraire, influencées par la performance de ces mêmes installations. Nous pouvons ainsi mettre en évidence des liens de causalité directe plus ou moins forts entre ces prestations et la performance énergétique.

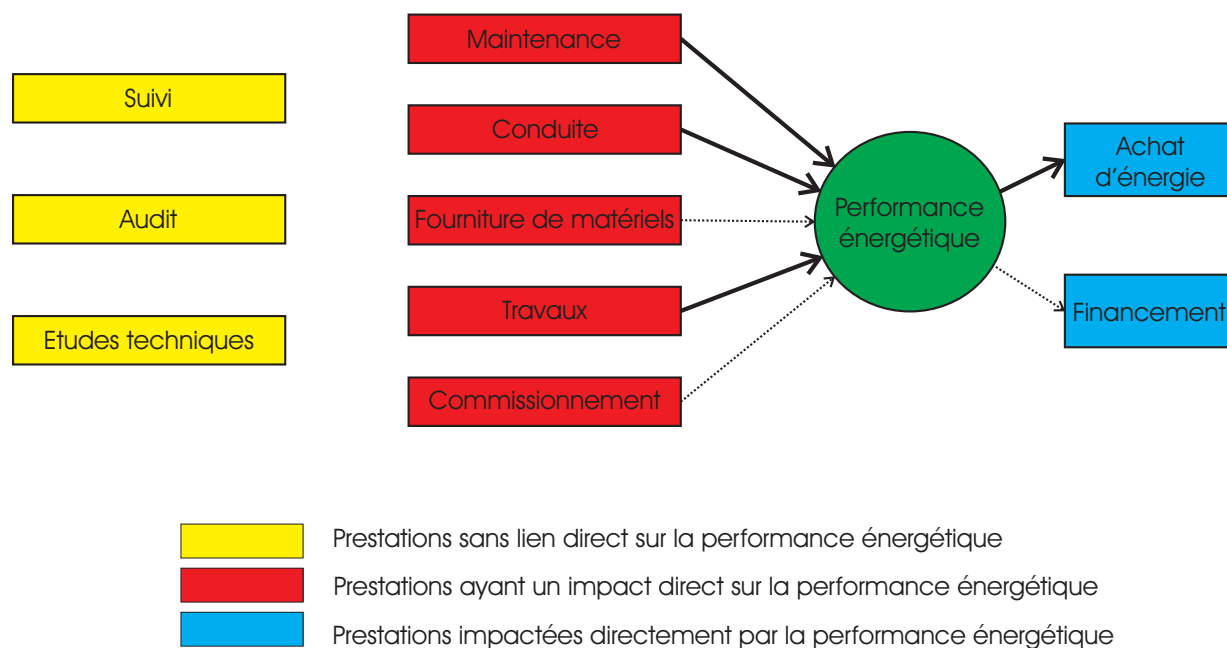


FIG. 2.1 – Influence directe des prestations élémentaires sur la performance énergétique des installations.

Interactions entre prestations élémentaires

De la même manière que nous avons mis en évidence les liens de causalité directe entre certaines prestations et la performance énergétique, il est possible de montrer les liens de causalité entre certaines prestations.

Les résultats des études d'ingénierie permettent de définir les caractéristiques des matériels à fournir pour la construction ou la réparation des installations : elles peuvent donc être orientées vers l'amélioration des performances énergétiques et se traduire par la prescription d'équipements performants. De même, des stratégies de maintenance et de conduite peuvent être définies grâce à ces mêmes études d'ingénierie. Par conséquent, comme le montre la figure 2.2, les études d'ingénierie permettent d'augmenter la performance énergétique des installations par l'intermédiaire de leur impact sur le résultat des travaux, de la fourniture de matériels, des opérations de maintenance et la conduite des installations.

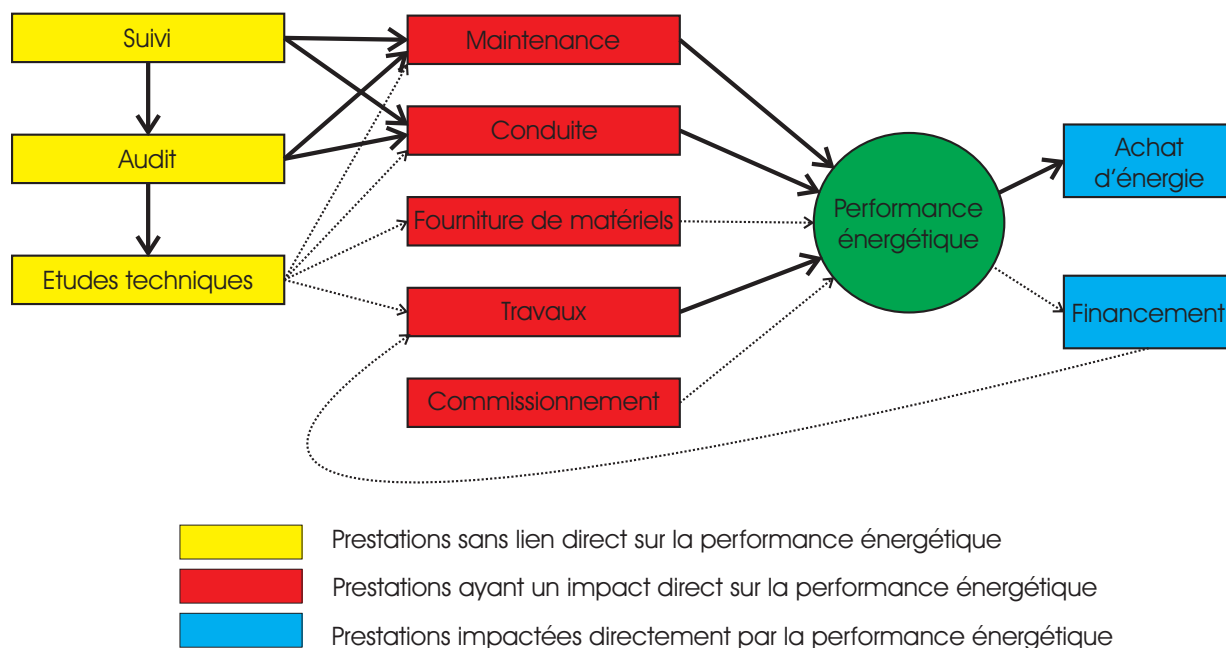


FIG. 2.2 – Interactions des prestations élémentaires sur la performance énergétique des installations.

L'audit énergétique a pour objectif de reconstituer les consommations d'énergie d'un bâtiment ou d'un site, d'identifier les sources de dérive des performances énergétiques et de formuler des stratégies d'amélioration du bâtiment ou du système. La réalisation d'un audit constitue une aide précieuse pour proposer des stratégies de conduite ou de maintenance plus performantes et permet donc d'améliorer les résultats des prestations de conduite et de maintenance. De plus, ces résultats alimentent les études techniques plus détaillées préalables à la réalisation de travaux d'amélioration des installations ou du bâtiment audités. Ainsi, un audit énergétique n'a pas d'influence directe sur la performance énergétique : *un audit n'aura d'influence qu'à condition que ces conclusions et recommandations se traduisent par la réalisation d'études techniques mais surtout par la réalisation des travaux préconisés.*

Enfin, le suivi des installations permet d'alimenter l'audit énergétique grâce aux données récupérées. En phase d'exploitation, le suivi des installations permet au prestataire d'améliorer les stratégies de conduite mises en place car il permet de repérer les dérives de performance en temps réel. De même, les prestations de maintenance peuvent être déclenchées utilement par l'observation de l'évolution des paramètres de fonctionnement des organes principaux de l'installation. C'est pourquoi, nous avons indiqué sur la figure 2.2 que la prestation « suivi » avait une forte influence sur les prestations « audit », « conduite » et « maintenance ».

Pour finir, nous noterons que la prestation de financement permet, entre autres, d'améliorer voire même de déclencher des investissements pour la réalisation de travaux, créant ainsi un cercle vertueux (cf. chapitre 3) permettant le financement de travaux d'amélioration des performances énergétiques des installations.

Bilan sur l'influence du contenu d'un contrat de services énergétiques sur son potentiel en efficacité énergétique

Nous venons de montrer les liens de causalité qui existent entre les prestations contenues dans un contrat de services énergétiques et la performance énergétique des installations, soit de manière directe, soit de manière indirecte par l'intermédiaire des interactions qui existent entre prestations. De plus, la figure 2.2 expose clairement que, du fait de ces liens entre prestations, la prestation « Achat d'énergie » est celle qui supporte, au final, l'ensemble des risques pouvant provenir de la réalisation des autres prestations. En cas de dérive des consommations ou en cas de dépassement des capacités allouées par le fournisseur d'énergie, le titulaire du contrat de fourniture (souvent le client lui-même) doit donc supporter les risques financiers éventuels liés à ces dépassements.

Ainsi, le potentiel en efficacité énergétique d'un contrat de services énergétiques sera d'autant plus important qu'un même prestataire supporte lui-même les risques consécutifs de la réalisation d'une prestation dont il a la charge et dont il est donc en mesure de maîtriser les risques. Dans le cas inverse, le prestataire subit les conséquences des réalisations des autres prestataires. Ce lien de causalité permet d'expliquer pourquoi, de manière naturelle, dans les contrats classiques, la prestation « achat d'énergie » est souvent associée à la prestation « conduite des installations ».

2.1.3 Influence de la portée d'un contrat sur son potentiel en efficacité énergétique

Comme nous l'avons décrit au paragraphe 1.1.2, la portée d'un contrat détermine la quantité et le type d'installations prises en charge par le prestataire. *Une portée de contrat accrue implique donc que le transfert des risques techniques liés à l'exploitation des installations est plus important.*

A ce type de risques viennent s'ajouter les risques liés à la variabilité des conditions de fonctionnement aux bornes du système sur lequel porte le contrat, et qui sont donc hors de portée du prestataire. En effet, les fournisseurs d'énergie en amont de l'installation ou les utilisateurs en aval sont susceptibles d'imposer des conditions de fonctionnement éloignées des conditions de fonctionnement nominales aux équipements pris en charge par le prestataire. On peut citer l'exemple de la distribution d'eau glacée pour laquelle la température de retour a une influence directe sur la performance des groupes frigorifiques. Ainsi, le prestataire doit supporter les conséquences du fonctionnement d'équipements sur lesquels il n'a pas la main. Cette configuration diminue donc d'autant sa capacité à agir pour maintenir les performances des installations. De même, une forte variation des besoins de consommation appelés par le client peut avoir des répercussions négatives. Ce risque est d'autant plus élevé que couramment, seules les installations de production d'énergie utile font l'objet d'un contrat, tandis que la conduite des installations de distribution reste sous la gestion du client, ou de l'utilisateur final.

Ainsi, une portée de contrat réduite diminue les leviers techniques sur lesquels un prestataire peut agir : le potentiel en efficacité énergétique du contrat s'en trouve donc diminué. En effet, nous pouvons légitimement supposer que le savoir-faire d'un prestataire de service lui permet d'accéder à un potentiel d'amélioration des installations plus

important que le client. Nous rappelons que la performance énergétique globale des installations est la conjugaison des performances de chaque installation de transformation d'énergie, depuis la production d'énergie utile jusqu'à sa distribution et à son usage. Par conséquent, on en déduit que, a priori, l'augmentation du potentiel technique en efficacité énergétique d'un contrat de services énergétiques implique que sa portée soit augmentée permettant ainsi à l'acteur le plus efficace de prendre le contrôle de toutes les étapes de transformation de l'énergie.

2.1.4 Influence des modalités de rémunération sur le comportement des acteurs

Nous avons établi que la portée et le contenu d'un contrat de services énergétiques influe sur le potentiel en efficacité énergétique de ce contrat : ce potentiel est directement lié au transfert et à la gestion du risque de dérive des performances énergétiques des installations. Cependant, ce potentiel en efficacité énergétique sera d'autant plus exploité que les modalités de rémunération imposent des contraintes financières sur les acteurs (cf. tableau 2.1).

Type de rémunération	Influence sur le comportement du client	Influence sur le comportement du prestataire
Prix forfaitaire	Laisser-aller	Augmentation de la productivité
Prix unitaire	Réduction des quantités consommées	Augmentation de la productivité et des quantités vendues

TAB. 2.1 – Influence des modalités de rémunération d'un contrat de service sur les parties prenantes du contrat.

En effet, si nous supposons que les parties prenantes d'un contrat de services énergétiques se comportent comme des agents économiques rationnels, nous pouvons légitimement dire que, d'un côté le client, bénéficiaire des services, cherchera à maîtriser les dépenses associées au contrat, tandis que, de l'autre côté, le prestataire, titulaire du contrat de services, cherchera à augmenter ses gains.

Ainsi, une rémunération au forfait n'a, a priori, pas d'influence sur le comportement du client du contrat puisque ses dépenses sont stabilisées. Il n'a donc aucune incitation rationnelle à maîtriser ses usages, et ne subit même aucune conséquence directe à les laisser augmenter, d'où une prédisposition au laisser-aller dans sa consommation du service. En revanche, si ses recettes sont également fixées par le forfait, le prestataire n'a d'autre solution, afin d'augmenter ses gains, que d'augmenter l'efficacité économique des prestations dont il a la charge.

Dans le cadre d'une rémunération par prix unitaire, les dépenses du client sont directement liées aux quantités consommées : ceci doit donc normalement inciter le client à les maîtriser. Cette maîtrise des quantités consommées n'est pas dans l'intérêt du prestataire dont la rémunération augmente avec la consommation des unités. De plus, pour un niveau

de consommation donné, le prestataire n'a d'autre solution que d'augmenter la rentabilité du service rendu par unité vendue pour augmenter ses gains. Une rémunération par prix unitaire constitue donc une double incitation pour le prestataire : une incitation à augmenter les quantités vendues d'une part, et une incitation à améliorer la productivité des prestations fournies d'autre part.

2.1.5 Synthèse

L'évaluation de l'efficacité énergétique portée par un acteur dans le cadre d'un contrat de services énergétiques repose sur l'analyse de deux composantes que nous venons d'explicitier :

- *la prise de contrôle des installations* qui détermine les leviers techniques sur lesquels les acteurs peuvent agir ;
- *l'incitation à l'amélioration des performances énergétiques* définie par les conséquences économiques pour les différents acteurs de l'évolution de la performance énergétique des installations.

La définition de ces deux composantes permet de mettre en place un plan (cf. figure 2.3) sur lequel nous pouvons situer la position de l'un des acteurs selon la structure du contrat de service mis en place.

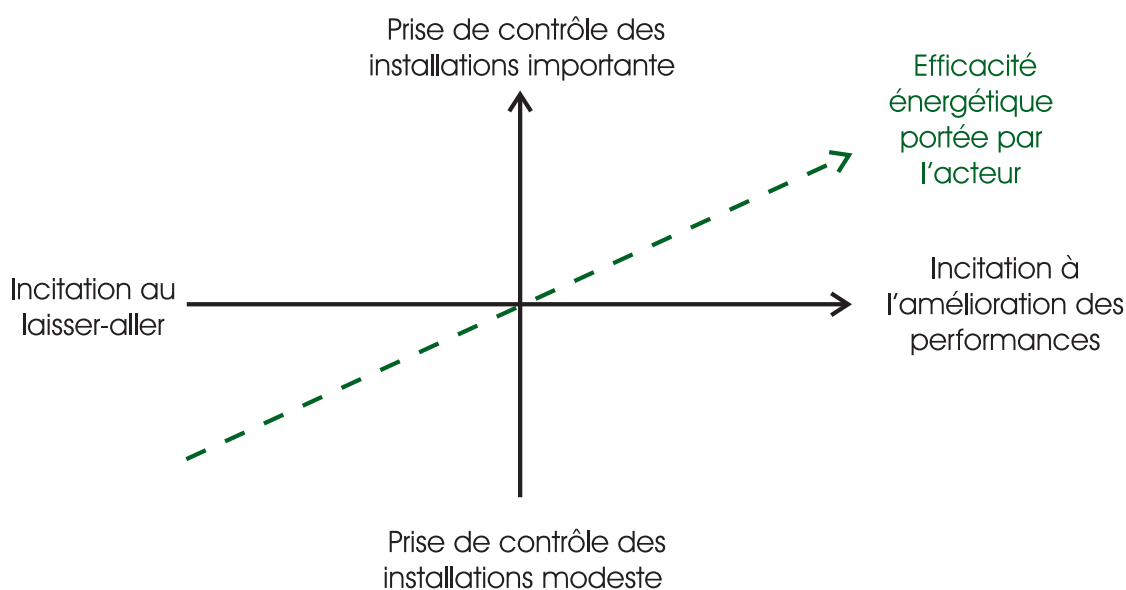


FIG. 2.3 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par un acteur dans le cadre d'un contrat de service énergétique.

L'efficacité énergétique de l'acteur considéré est évaluée par une droite orientée depuis les situations « Incitation au laisser-aller » associées à une « Prise de contrôle des installations modeste », vers les situations « Incitation à l'amélioration des performances » associées à une « Prise de contrôle des installations importante ». On pourra noter que *la pente de cette droite est volontairement davantage orientée vers la dimension « Incitation » que vers la dimension « Prise de contrôle des installations »*, car comme nous

l'avons vu, l'incitation est le principal moteur de l'amélioration des performances énergétiques pour les acteurs.

Dans le cadre d'un contrat de services énergétiques deux acteurs principaux interviennent : le prestataire et le client. Après avoir évalué l'efficacité énergétique portée par chacun des acteurs indépendamment, nous allons donc reporter ces évaluations dans un autre plan permettant ainsi de comparer l'efficacité énergétique de différents contrats (cf. figure 2.4).

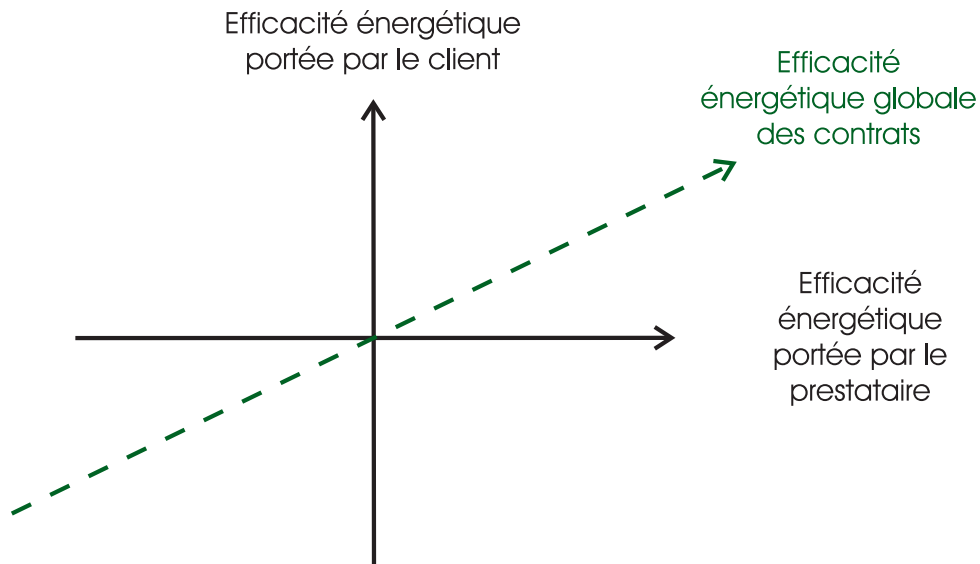


FIG. 2.4 – Représentation de l'efficacité énergétique globale d'un contrat de service énergétique.

L'efficacité globale des contrats est alors évaluée par une droite orientée davantage vers l'efficacité énergétique portée par les prestataires que vers celle portée par le client, car nous supposons que le prestataire possède un meilleur savoir-faire technique que le client.

2.2 Application aux marchés d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence l'efficacité énergétique portée par les contrats classiques d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique, tels que nous les avons présentés dans le chapitre 1. Nous analyserons d'abord l'efficacité énergétique portée par le prestataire, puis celle portée par le client, avant d'en déduire, par combinaison, l'efficacité énergétique de chacun des types de contrat.

2.2.1 Efficacité énergétique portée par le prestataire

Contrats de type « Prestation Forfait » (PF)

Ces contrats ne prennent pas en charge la prestation « Achat d'énergie », qui reste donc à la charge du client : ce type de contrat ne fait donc pas porter au prestataire les risques de dérive des performances énergétiques. La rémunération de ce type de contrat est une rémunération forfaitaire, ce qui stabilise les revenus du prestataire. Ne supportant pas les risques de la réalisation des prestations « maintenance » et « conduite », il serait à craindre que le prestataire recherche des économies sur les moyens mis en œuvre pour assurer ces prestations.

Ce type de contrat est donc caractérisé par une légère incitation au laisser-aller pour le prestataire, tandis que la prise de contrôle des installations reste limitée à la conduite et la maintenance des installations (cf. figure 2.5).

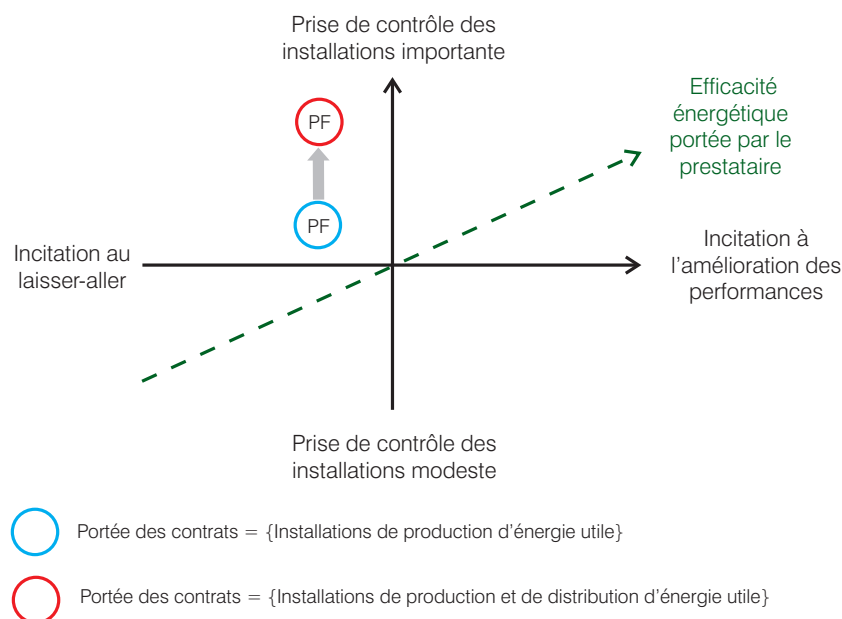


FIG. 2.5 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Prestation Forfait ».

Une portée de contrat étendue aux installations de distribution d'énergie utile augmente la prise de contrôle par le prestataire sans modifier son incitation. Afin de limiter ce risque de dérive, les contrats de type « Prestation Forfait » sont à garantie de moyens, ce qui permet au client de s'assurer d'un minimum de moyens mis en œuvre pour maintenir le niveau de performance énergétique de ses installations ou, du moins, en limiter les dérives.

Contrats de type « Marché Forfait » (MF) et « Marché Température » (MT)

Dans le cadre d'un contrat « Marché Forfait », le prestataire supporte les risques de la prestation « achat d'énergie ». Il dispose cependant des leviers techniques lui permettant de limiter les risques de dérive de performance des installations. De plus, le contrat étant rémunéré au forfait, le prestataire a tout intérêt à rechercher des sources de rentabilité, donc en partie, à rechercher des solutions d'amélioration des performances énergétiques de l'installation. Cependant, comme sa rémunération est fixe, le prestataire effectuera cet effort dans la mesure où les économies réalisées sur l'approvisionnement en énergie compensent les moyens mis en œuvre pour réduire la facture énergétique nécessaire à la réalisation de ces obligations de résultats sur le service rendu. Notons enfin, que si le prestataire bénéficie de la totalité des économies générées sur la facture énergétique, le client est toutefois informé du montant de ces économies, dans la mesure où le prestataire est tenu de lui communiquer les volumes d'énergie réellement consommées ([Loi n°77-804]).

Ce type de contrat est donc caractérisé par une prise de contrôle des installations importante, et par une incitation forte à l'amélioration des performances des installations (cf. figure 2.6).

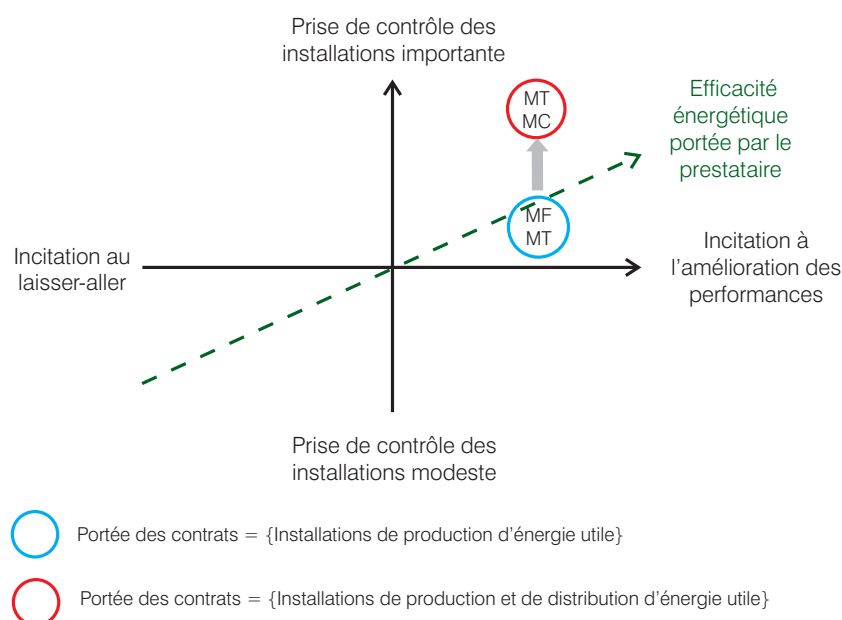


FIG. 2.6 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Marché Forfait ».

Si la portée du contrat est étendue aux installations de distribution d'énergie utile, l'incitation à l'amélioration des performances reste inchangée. En revanche, l'augmentation de la prise de contrôle des installations se traduit au final par un potentiel d'amélioration plus important, comme le met en évidence la position de ce contrat par rapport à la droite représentant l'efficacité énergétique portée par le prestataire.

La structure d'un contrat de type « Marché Température » est strictement identique à celle d'un contrat de type « Marché Forfait » : l'unique différence entre ces deux types de contrat réside dans l'ajustement du montant de la rémunération du contrat « Marché Température » à la température extérieure comme nous l'avons présenté dans le paragraphe 1.2.3 .

Or ce facteur d'ajustement est hors du contrôle des parties du contrat : il ne constitue donc pas une source d'incitation supérieure ou moindre pour le prestataire. La position de ce type de contrat sur la figure 2.6 est donc la même que pour les contrats de type « Marché Forfait ».

Contrats de type « Marché Comptage » (MC)

Dans ce type de contrat, le prestataire supporte une partie des risques de la prestation « Achat d'énergie ». Sa rémunération est indexée sur l'énergie utile vendue alors que dans le même temps, il supporte les coûts de l'énergie finale consommée pour la production de cette énergie utile. *Le prestataire est donc incité à améliorer les performances des installations de production d'énergie utile* de la même manière que dans le cadre des contrats de type « Marché Forfait » ou « Marché Température » que nous venons de décrire (cf. figure 2.7).

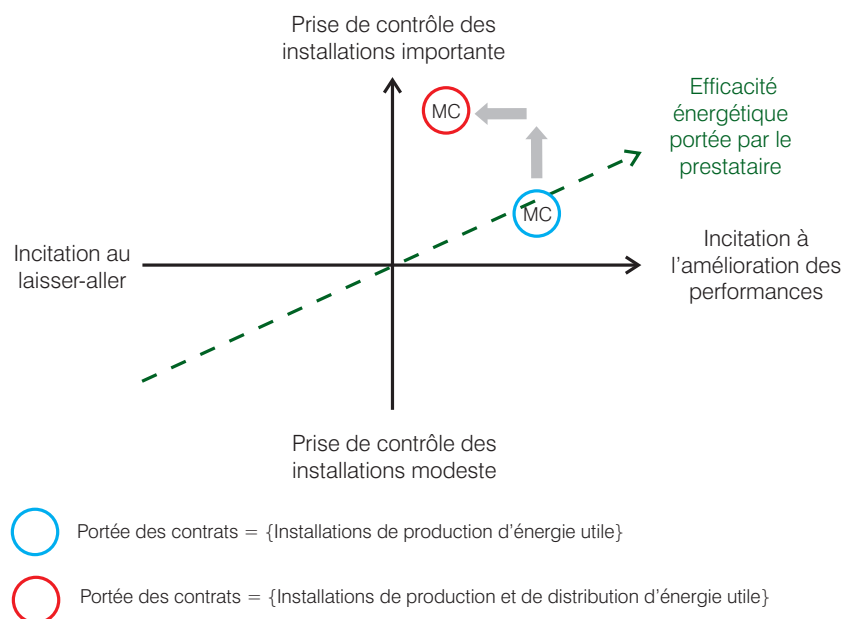


FIG. 2.7 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Marché Comptage ».

En effet, dans ces deux contrats, le moteur de l'incitation pour le prestataire est identique : son intérêt réside dans l'amélioration du rendement de la chaîne énergétique des appareils de production d'énergie utile.

En revanche, si la portée du contrat est étendue aux installations de distribution, cette incitation est diminuée par la tentation d'augmenter la rémunération du contrat en augmentant les quantités vendues. Par conséquent, *sur les installations de distribution d'énergie utile, l'incitation pour le prestataire est plutôt orientée au laisser-aller*. Nous pouvons donc supposer que l'incitation globale pour le prestataire est diminuée lorsque la portée du contrat augmente.

Contrats de type « Combustible Prestation » (CP)

La structure des contrats de type « Combustible Prestation » se différencie de la structure des contrats de type « Marché Comptage » par le fait que la rémunération du contrat est indexée sur l'énergie finale consommée pour le fonctionnement des installations, et non pas sur la quantité d'énergie utile réellement consommée. Ceci a pour conséquence que les risques de dérive des performances énergétiques des installations, et donc le risque de surconsommation d'énergie, n'est plus porté par le prestataire mais directement par le client (cf. figure 2.8).

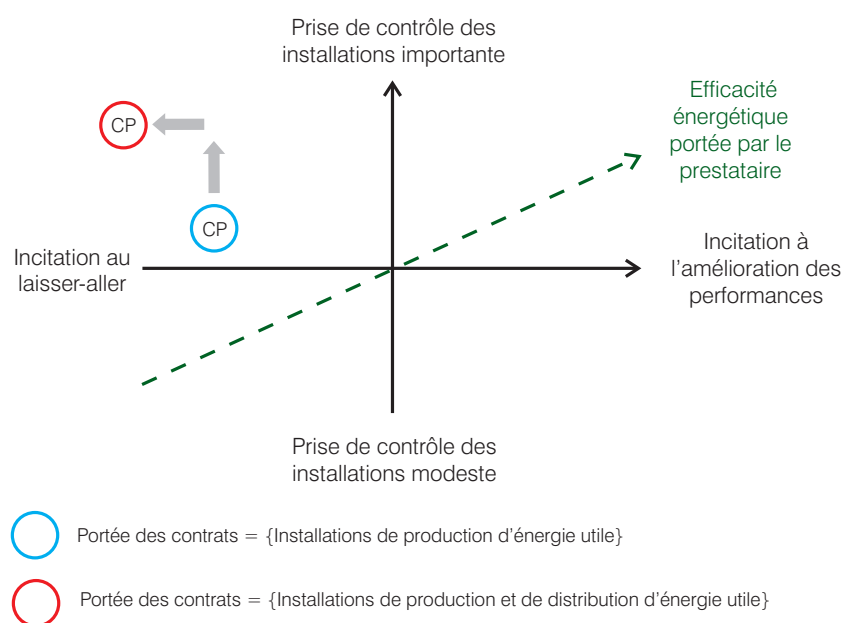


FIG. 2.8 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Combustible Prestation ».

Par conséquent, *le potentiel en efficacité énergétique de ce type de contrat est intrinsèquement moins élevé que les autres types de contrats*, car l'acteur qui a la main sur l'installation n'est pas celui qui supporte le risque de surconsommation. Le prestataire n'a aucun intérêt à augmenter l'efficacité énergétique de l'installation puisque sa rémunération est indexée sur la quantité de combustible fournie.

L'incitation est même plutôt inversée car une dégradation des performances de l'installation induirait une augmentation de la quantité de combustible consommé, et donc de la rémunération du contrat. Ainsi, en réduisant ses efforts sur la maintenance ou la conduite de l'installation, le prestataire augmente d'abord sa marge sur le prix unitaire de la prestation, puis augmente le nombre d'unités consommées. Au final, ce type de contrat contient une double incitation pour le prestataire à ne pas faire d'efforts en faveur de l'efficacité énergétique.

Enfin, de la même manière que pour le contrat de type « Marché Comptage », cette incitation au laisser-aller est accentuée par l'extension de la portée du contrat.

Bilan : efficacité énergétique portée par le prestataire

Les résultats de l'analyse menée dans ce paragraphe sont synthétisés sur la figure 2.9. Nous y avons représenté les positions de chaque contrat pour les deux portées de contrats étudiées : une portée limitée aux installations de production d'énergie utile et une portée étendue aux installations de production et de distribution d'énergie utile.

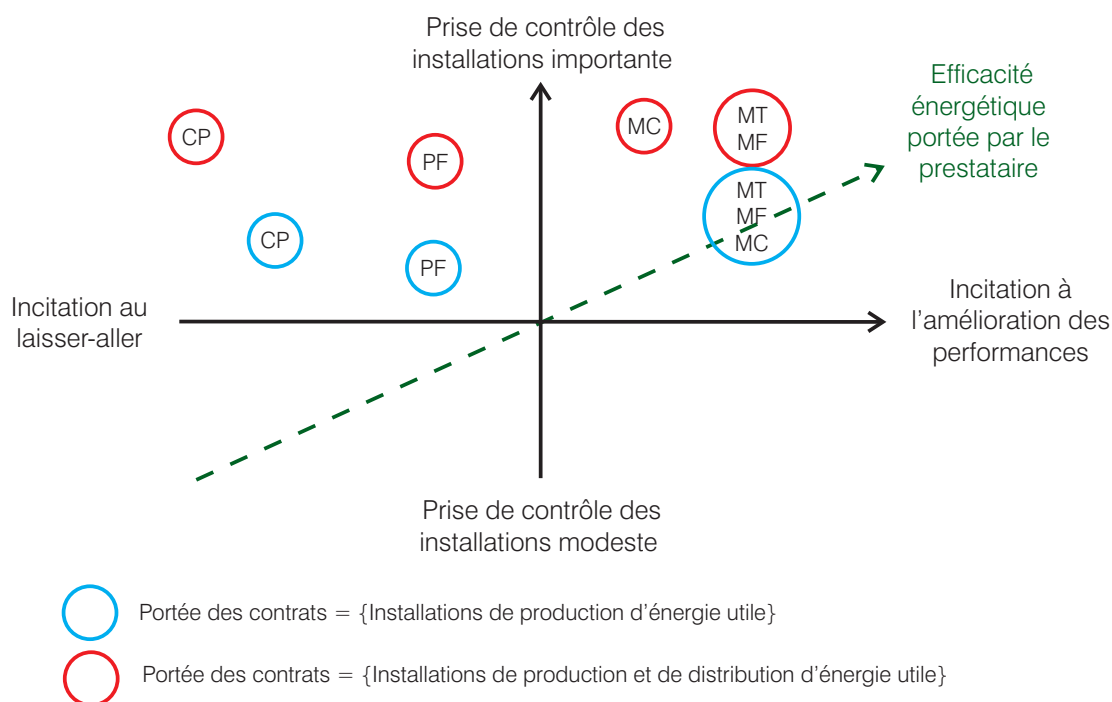


FIG. 2.9 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.

2.2.2 Efficacité énergétique portée par le client

De la même manière que nous venons de le décrire, nous appliquons la méthode d'analyse développée en tête de cette partie pour évaluer l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats types d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.

Contrats de type « Prestation Forfait » (PF)

En lui-même ce contrat ne comporte *aucune incitation à l'amélioration de l'efficacité énergétique des installations*, car il décharge le client d'une partie importante du contrôle des installations. Cet abandon du contrôle des installations est particulièrement accentué dans le cas où la portée du contrat est étendue aux installations de distribution d'énergie utile.

Le client conserve la gestion de l'approvisionnement en énergie de ces installations par l'intermédiaire d'un autre contrat de service énergétique ou plus simplement par l'intermédiaire d'un contrat classique de fourniture d'énergie. Les éventuelles incitations à maîtriser les consommations d'énergie sont donc extérieures à ce contrat, et nous considérons que l'incitation portée par un contrat de type « Prestation Forfait » est nulle (cf. figure 2.10).

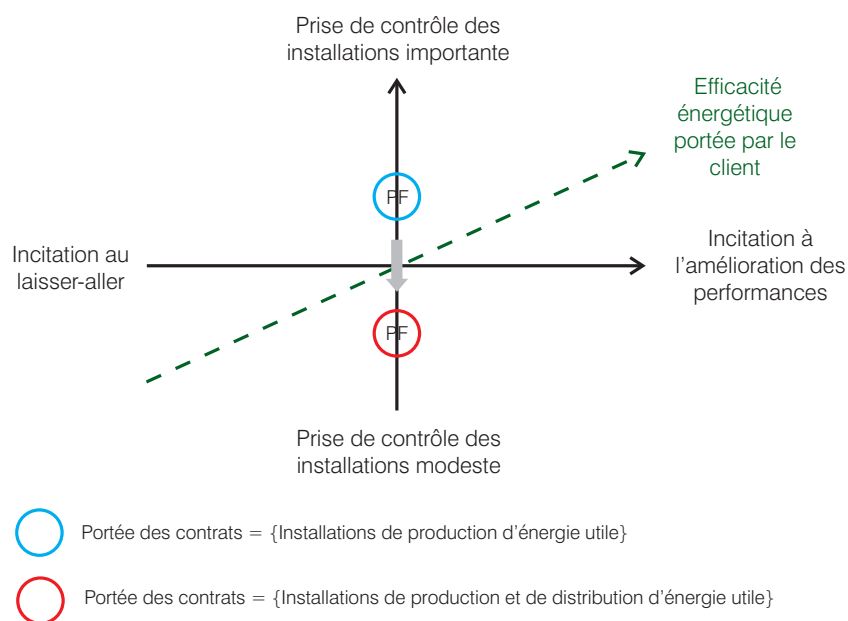


FIG. 2.10 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Prestation Forfait ».

Contrats de type « Marché Forfait » (MF) et « Marché Température » (MT)

A l'inverse du prestataire, le client est plutôt *incité au laisser-aller* dans son utilisation des installations puisque ses dépenses sont stabilisées par les modalités de rémunération au forfait (cf. figure 2.11). L'indexation de la rémunération selon la température ne modifie en rien cette analyse, car comme nous l'avons remarqué précédemment, le climat est un facteur en dehors de tout contrôle des parties prenantes du contrat. L'extension de la portée du contrat ne fait qu'accroître la perte de contrôle du client, mais ne modifie pas son incitation au laisser-aller.

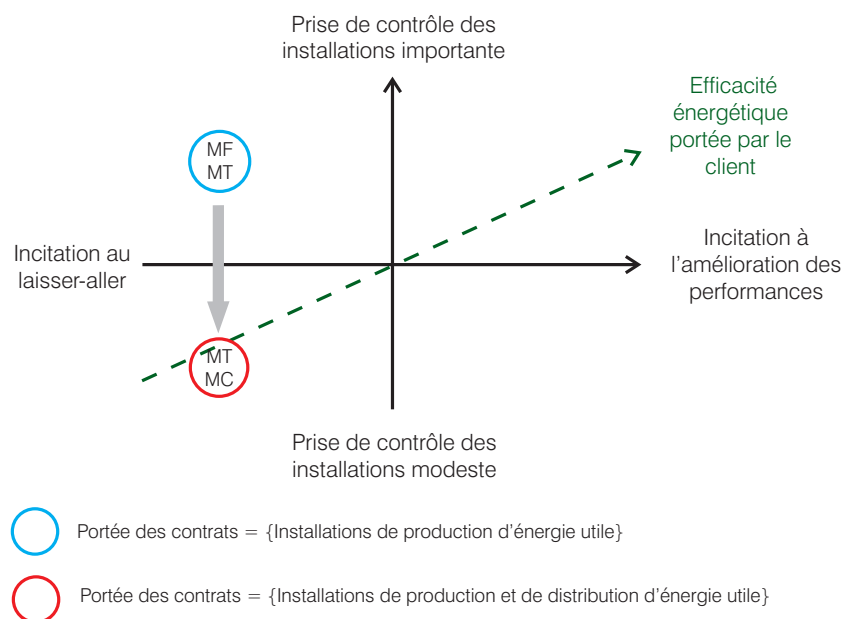


FIG. 2.11 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Marché Forfait » et « Marché Température ».

Contrats de type « Marché Comptage » (MC)

Comme nous l'avons montré dans l'analyse du potentiel en efficacité énergétique des contrats de services énergétiques, *le client est fortement incité à maîtriser ses consommations d'énergie*, car il supporte également une partie des risques de la prestation « achat d'énergie » puisque le coût des services est indexé sur les quantités d'énergie utile consommée.

Si la portée du contrat s'étend sur l'ensemble des installations, y compris les installations de distribution d'énergie utile, le seul levier sur lequel le client est en mesure d'agir est la quantité d'usage final consommé. C'est pourquoi, ce type de contrat incite fortement le client à réduire ses besoins en usage final.

De plus, lorsque la portée du contrat est réduite aux seules installations de production d'énergie utile, l'incitation pour le client reste la même. L'efficacité énergétique portée par le client augmente alors, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.12, car le client peut alors directement agir sur les installations de distribution d'énergie utile.

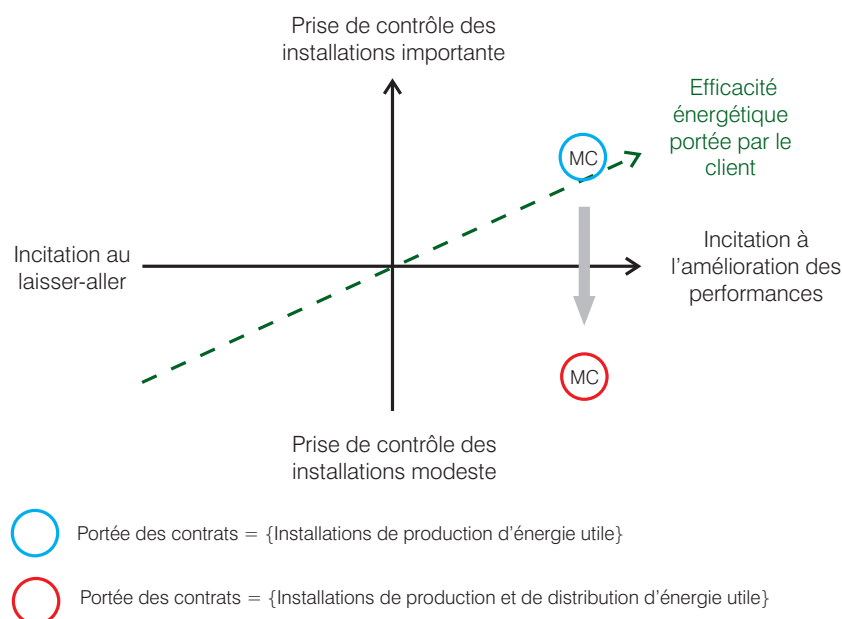


FIG. 2.12 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Marché Comptage ».

Contrats de type « Combustible Prestation » (CP)

Dans ce type de contrat, le risque de surconsommation d'énergie est directement porté par le client. Par conséquent, ces contrats comportent naturellement *une incitation à la maîtrise des usages finals pour le client* puisque celui-ci bénéficie en premier lieu des efforts qu'il produit en faveur de la maîtrise de l'énergie, au rendement de l'installation près.(cf. figure 2.13).

Il faut toutefois apporter une nuance à cette affirmation dans le cas où plusieurs utilisateurs se partagent l'utilisation d'une même installation. Contrairement au cas d'un contrat de type « Marché Comptage » dans lequel chaque utilisateur final paye sa propre consommation et bénéficie donc directement des économies qu'il peut générer, les utilisateurs finals d'une installation commune doivent se partager une facture unique dans le cadre d'un contrat de type « Combustible Prestation ». Dans ce cas, chaque utilisateur doit partager les économies qu'il peut générer avec les autres utilisateurs, ce qui constitue un frein à l'incitation à la maîtrise des consommations. Nous pouvons couramment remarquer cette configuration dans les copropriétés dépourvues d'appareils individuels de comptage de consommations de chauffage.

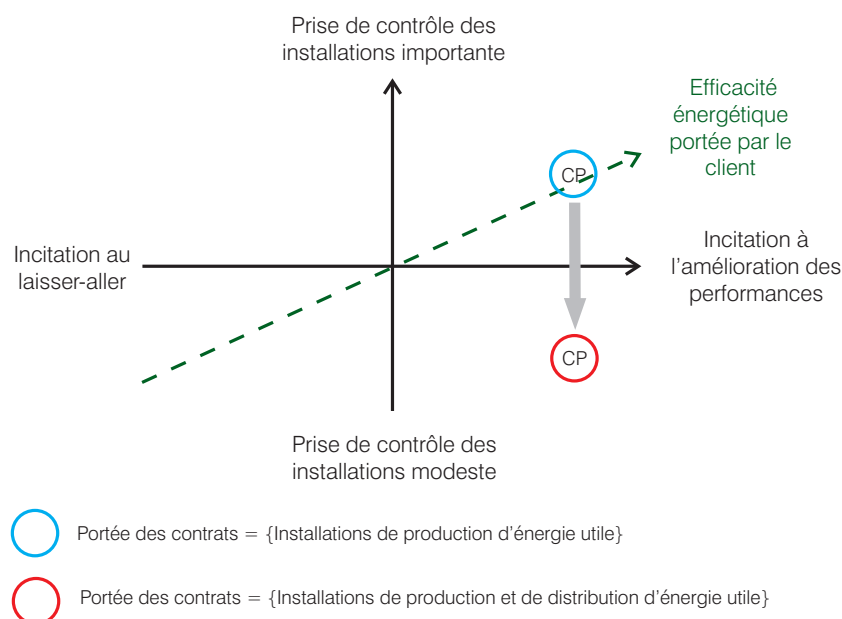


FIG. 2.13 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Combustible Prestation ».

Bilan : efficacité énergétique portée par le client

Les résultats de l'analyse que nous venons de mener sont représentés sur la figure 2.14.

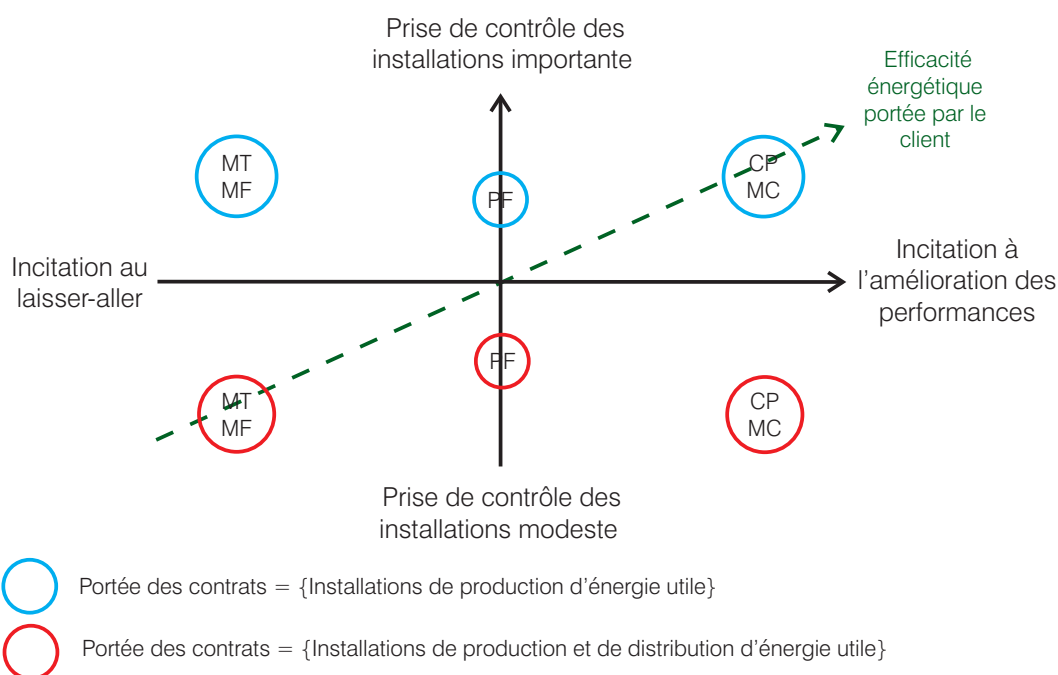


FIG. 2.14 – Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.

2.2.3 Bilan sur l'efficacité énergétique portée par les contrats d'exploitation des installations de chauffage ou de production frigorifique

Comme nous venons de l'établir, chacun des types de contrats d'exploitation des installations de chauffage ou de production frigorifique porte une incitation plus ou moins forte à générer des économies d'énergie en direction de l'un ou l'autre des acteurs. D'autre part, la structure de ces différents contrats donne différemment le contrôle des installations à l'un ou l'autre des acteurs, ce qui leur permet d'agir sur les leviers techniques nécessaires à l'amélioration des performances énergétiques des installations. Le potentiel en efficacité énergétique de chaque type de contrat est donc maximum quand les incitations portées par les contrats coïncident avec la prise en charge des installations par l'acteur qui en supporte le risque de dérive.

Ceci nous permet donc de déterminer la portée optimale de chaque type de contrat du point de vue de l'efficacité énergétique. Ainsi, dans le tableau 2.2, nous pouvons lire pour chaque contrat quel est l'acteur qui, d'après l'analyse que nous venons de mener, devrait prendre en charge les installations de production et de distribution d'énergie utile afin de maximiser le potentiel en efficacité énergétique, ce qui revient du point de vue de la structure des contrats à déterminer la portée optimale du contrat de services énergétiques à mettre en place. Dans les cas où le choix de l'acteur qui prend en charge l'installation n'a pas d'influence sur le transfert des risques ou sur l'incitation à améliorer la performance énergétique (comme pour les contrats de type « Prestation Forfait »), nous avons émis l'hypothèse que le savoir-faire des prestataires de services énergétiques permettait a priori d'atteindre un potentiel d'efficacité énergétique supérieur à celui que le client, dont ce n'est pas le coeur de métier, pourrait atteindre.

Désignation	Acteur prenant en charge les installations de production d'énergie utile	Acteur prenant en charge les installations de distribution d'énergie utile
Prestation Forfait	Prestataire	Prestataire
Marché Forfait	Prestataire	Prestataire
Marché Température	Prestataire	Prestataire
Marché Comptage	Prestataire	Client
Combustible Prestation	Client	Client

TAB. 2.2 – Portée optimale pour l'amélioration des performances énergétiques des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.

Enfin, nous pouvons finalement porter la position de chaque contrat sur le diagramme présenté précédemment sur la figure 2.4 et en déduire l'efficacité énergétique relative de chaque contrat, selon sa portée. Nous faisons apparaître sur la figure 2.15 que du point de vue des performances énergétiques :

- les contrats de type « Marché Comptage » ont le contenu en efficacité énergétique le plus important ;
- les contrats de type « Combustible Prestation » ont le contenu en efficacité énergétique le plus faible.

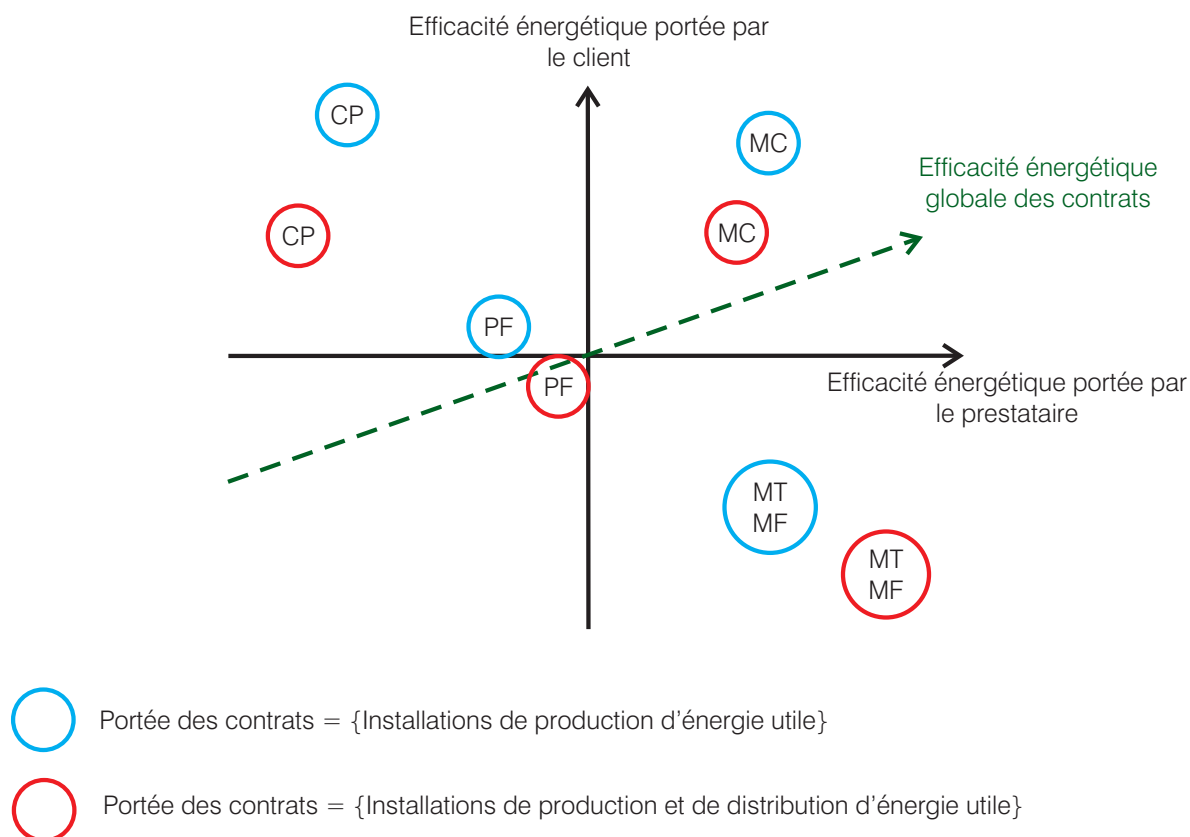


FIG. 2.15 – Incitation à l'efficacité énergétique des différents contrats d'exploitation.

Nous pouvons également ajouter que le potentiel en efficacité énergétique d'un contrat de type « Combustible Prestation » serait maximal dans le cas où le client reprend la main sur la conduite et la maintenance des installations. Ceci se justifie toujours en reprenant l'idée que nous avons exprimée tout au long de ce chapitre : pour améliorer l'efficacité énergétique d'une installation, il est préférable de confier son contrôle à l'acteur qui supporte les risques de dérive des performances des installations.

Mais pour les contrats de type « Combustible Prestation » ceci reviendrait en définitive à vider le contrat de son contenu, puisque le prestataire ne se verrait confier ni installation, ni prestation. *Nous pouvons donc en conclure que du point de vue des performances énergétiques, l'existence de contrat de type « Combustible Prestation » n'est pas justifiée.*

Chapitre 3

Offres de services énergétiques dédiée à l'amélioration de l'efficacité énergétique

3.1 Les clauses d'intéressement aux économies d'énergie

3.1.1 Introduction de dispositions de valorisation des économies d'énergie par les pouvoirs publics

Nous avons décrit dans le chapitre 2 de quelle manière la structure d'un contrat de service énergétique, et notamment des contrats types d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique, pouvait influencer sur l'efficacité énergétique d'une installation pendant sa phase d'exploitation. Dans le but de renforcer les incitations économiques naturelles présentes dans ces contrats, les pouvoirs publics ont introduit la possibilité de mettre en place des clauses d'intéressement sur la performance énergétique des installations en direction des prestataires. Ces clauses sont présentes depuis plusieurs années dans les contrats d'exploitation mais sont précisées de nouveau dans la dernière version du guide de rédaction des clauses techniques des marchés publics d'exploitation des installations de chauffage publié en 2007 par l'Observatoire Économique de l'Achat Public [GEM/CC, 2007]. Enfin, précisons que de telles clauses sont également présentes dans les contrats de services énergétiques mis en place dans le secteur privé : comme pour les structures classiques de contrats de services énergétiques, les fournisseurs de services énergétiques ont rapidement intégré ces nouvelles dispositions dans leur offre de contrats en direction des clients du secteur privé.

Il est ainsi rappelé que ces clauses prévoient « le partage des économies ou des excès de consommation de combustible par rapport à une consommation de base définie pour un hiver moyen ». L'objectif indiqué est d'inciter les deux acteurs à œuvrer dans le même sens en faveur de l'amélioration des performances énergétiques : le client est censé veiller à mettre en place « des actes de gestion et de maîtrise des consommation énergétiques », tandis que le prestataire doit veiller « au maintien de l'optimisation des performances énergétiques » des installations. Ces clauses d'intéressement peuvent être inscrites dans tous les contrats décrits dans le paragraphe 2.2 sauf aux contrats de type « Marché For-

fait ». Pour les contrats de type « Prestation Forfait », ces clauses d'intéressement sont appliquées sur la rémunération au forfait des prestations de maintenance et de conduite des installations, tandis que pour les autres types de contrats, elles sont appliquées à la rémunération de la prestation « Achat d'énergie », quelque soit le type de rémunération initiale, au forfait ou par prix unitaire.

Le montant des intéressements est calculé en fin d'exercice sur la base de l'écart entre le montant global de la consommation réelle mesurée et corrigée du climat (cf. paragraphe 1.2.3) et d'une consommation de référence déterminée lors de la mise en place du contrat et définie comme « la consommation de combustible pour un hiver moyen ». Pour les installations existantes, il est d'usage de récupérer les factures énergétiques réelles pour en faire la moyenne après en avoir corrigé individuellement le montant par le nombre de degrés-jours, et éventuellement de l'occupation pour certains bâtiments dont l'occupation est intermittente (comme les établissements scolaires, par exemple). La mise en place de ce type de clause est interdite la première année d'exploitation des installations neuves. Il est demandé d'attendre une année d'exploitation pour pouvoir disposer des éléments mesurés permettant de construire la consommation de référence.

La valeur des économies d'énergie est partagée à égalité entre les deux acteurs, tandis que les dépassements de consommation sont pris en charge pour les deux tiers du montant total par le prestataire, le tiers restant étant à la charge du client ([GEM/CC, 2007]). Cependant, les quinze premiers pour cent d'excès doivent être pris en charge intégralement par le prestataire comme on peut le lire sur la figure 3.1. De plus, si la consommation d'énergie constatée est supérieure de quinze pour cent à la consommation prévue, le client a la possibilité de demander la modification de la consommation de base pour le calcul des dépassements ou des économies.

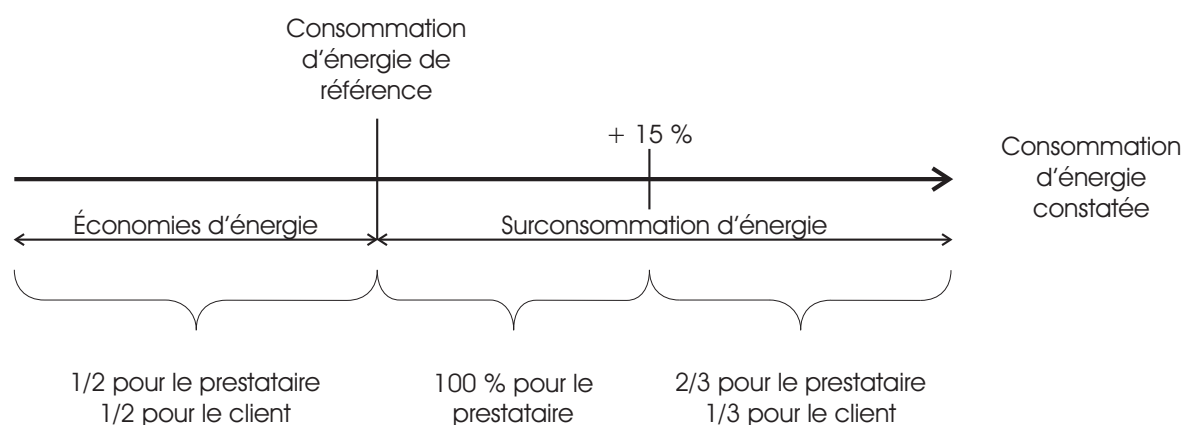


FIG. 3.1 – Répartition des économies d'énergie ou des surconsommations d'énergie entre le prestataire et le client dans le cadre d'un contrat type d'exploitation des installations de chauffage ([GEM/CC, 2007]).

3.1.2 Impact des clauses d'intéressement aux économies d'énergie sur l'efficacité énergétique portée par les contrats de services énergétiques

L'objectif avoué de l'insertion de clauses d'intéressement aux économies d'énergie est d'inciter simultanément les deux parties à œuvrer dans le sens de l'amélioration des économies d'énergie. Cependant, si nous reprenons l'analyse menée dans la partie précédente, nous pouvons nuancer cette affirmation.

Influence sur l'incitation économique à l'amélioration des performances des installations pour les contrats rémunérés au forfait

L'introduction de clauses d'intéressement aux économies d'énergie impose le partage des économies réalisées entre les deux acteurs. Dans un contrat d'exploitation classique, le prestataire investit dans l'amélioration de la performance de l'installation à hauteur de ce qui peut être rentabilisé par les économies qu'il obtient sur la facture énergétique. En partageant ces économies, les gains sur la facture énergétique entraînant la rentabilité des investissements sont divisés par deux. Un investissement qui est rentable dans le cadre d'un contrat sans clause d'intéressement, ne devient plus rentable du point de vue du prestataire dans le cadre d'un contrat avec clause d'intéressement, ou nécessite une plus longue durée d'exploitation pour obtenir un retour sur investissement. Comme l'insertion d'une clause d'intéressement ne modifie pas la durée classique d'un contrat, on en déduit que l'investissement ne se fera pas et que le prestataire privilégiera des solutions à moindre investissement, générant moins d'économie d'énergie.

Ainsi, dans le cas où le prestataire est, par la structure du contrat, incité à améliorer les performances énergétiques des installations, l'insertion de clauses d'intéressement est contre-productive. D'ailleurs, on notera qu'il n'existe pas de contrats « Marché Forfait », qui correspondent totalement au cas de figure qui vient d'être évoqué. Les contrats de type « Marché Température » ou « Marché Comptage » entrent également dans ce cas de figure et on peut donc s'interroger sur la pertinence de l'insertion de clauses d'intéressement.

Inversement, le partage des économies incite les acteurs qui n'étaient pas auparavant intéressés par l'amélioration des performances à contribuer aux efforts d'amélioration. Ainsi, dans les contrats de type « Marché Température », le client est incité à réduire, ou du moins contrôler ses usages finals de l'énergie. De même, dans les contrats « Prestation Forfait », les clauses d'intéressement favorisent l'implication du prestataire dans l'amélioration des performances : cela permet de reporter sur le prestataire une partie des risques de dérive des performances des installations et de rentabiliser les efforts supplémentaires qu'il pourra faire par rapport à un contrat sans intéressement en lui reversant la moitié du bénéfice sur la facture énergétique. Pour ce type de contrat, l'insertion de clauses d'intéressement représente une réelle incitation à l'amélioration des performances énergétiques des installations.

Un contrôle contractuel de l'évolution des performances pour les marchés à prix unitaire

La problématique est légèrement différente pour les contrats rémunérés par un prix unitaire. En effet, le prestataire est rémunéré au volume d'énergie utile vendue ou d'énergie finale consommée. Il bénéficie donc généralement directement d'une augmentation des consommations.

Dans le cadre des contrats de type « Combustible Prestation », nous avons montré précédemment que le prestataire n'a aucune incitation à améliorer les performances des installations. L'insertion d'une clause d'intéressement ne change rien puisque le montant de l'intéressement sur les économies versé par le client, ne compense que la moitié de la baisse de rémunération due à une augmentation des performances des installations. En revanche, la consommation de l'installation est contrôlée par les pénalités de surconsommation mises en place avec les clauses d'intéressement. Ainsi, l'incitation à laisser dériver les performances des installations afin d'augmenter la rémunération du contrat disparaît. Le prestataire n'est incité ni à augmenter ni à diminuer les consommations d'énergie : les clauses d'intéressement et les pénalités de surconsommation contrôlent et stabilisent les consommations d'énergie. Il y a donc bien un intérêt à adjoindre des clauses d'intéressement aux contrats de type « Combustible Prestation ».

L'effet est le même pour les contrats de type « Marché Comptage » pour la prise en charge des installations de distribution d'énergie utile, c'est-à-dire pour les installations situées, dans la chaîne de transformation de l'énergie, en aval du système de comptage qui sert d'index pour le calcul du montant de la rémunération. En revanche, pour la partie amont, on retrouve le raisonnement décrit auparavant : le partage des économies réalisées diminue la rentabilité des actions en faveur de l'amélioration des performances énergétiques.

Bilan sur l'ajout de clauses d'intéressement aux contrats classiques

Au final, l'ajout de clauses d'intéressement est surtout bénéfique pour les contrats de type « Prestation Forfait ». Comme nous l'avons dit, ces clauses d'intéressement semblent contre-productives pour les contrats « Marché Température », tandis qu'elles stabilisent la consommation des contrats à rémunération à prix unitaire grâce aux pénalités qui les accompagnent.

Cependant, l'insertion de ces clauses d'intéressement a un effet indirect bénéfique. En effet, quel que soit le mode de rémunération, tous les prestataires doivent transmettre à leur client la consommation réelle corrigée du climat, alors qu'auparavant la correction climatique ne concernait que certains types de contrats. Ainsi, le suivi des performances des installations est renforcé et davantage transparent pour le client. Ce dernier peut ainsi avoir une meilleure connaissance de son installation qui pourra être bonifiée lors d'une future négociation de contrat d'exploitation de ses installations.

3.2 Du contrat de performance énergétique

3.2.1 Les « ESCOs »

La mise en œuvre de solutions d'amélioration de la performance énergétique se heurte traditionnellement à trois barrières principales [CTI, 2003] :

- le manque d'expertise des consommateurs en matière d'efficacité énergétique et donc une ignorance du potentiel d'amélioration des performances de leurs installations,
- le manque de moyens ou de temps consacré par les consommateurs à la gestion de l'énergie, qui n'est pas leur cœur de métier,
- la difficulté à obtenir des financements pour investir dans l'amélioration des installations.

Devant ce constat, un type particulier de société a vu le jour, il y a quelques décennies en Amérique du Nord : il s'agit des « Energy Services Companies (ESCO) ». L'association américaine NAESCO (National Association of Energy Service Companies) définit une ESCO comme une entreprise qui développe, installe et finance des projets d'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements et des installations techniques [NAESCO, 2007]. Les offres de services énergétiques proposés par les ESCOs sont basées sur une garantie d'amélioration des performances énergétiques contrairement aux contrats classiques dont le but principal est le maintien des performances dans le temps.

Ainsi, afin de rechercher le potentiel d'amélioration des performances énergétiques, les offres de services énergétiques des ESCOs comprennent la réalisation d'un audit énergétique puis des études techniques nécessaires à la spécification d'un projet complet d'amélioration des performances énergétiques. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2.1 de cette partie, ces prestations permettent d'agir indirectement sur les performances énergétiques des installations par la réalisation de travaux ainsi que l'élaboration de stratégies de conduite et de maintenance optimisées.

De même, une ESCO ne prend pas non plus nécessairement directement en charge la conduite ou la maintenance des installations : son offre de services énergétiques consiste à élaborer des stratégies de conduite et de maintenance nécessaires à la réalisation du niveau de performance énergétique mis en évidence lors de l'audit énergétique (cf. figure 3.2). Les prestations de conduite et de maintenance des installations sont, le cas échéant, assurées par des sociétés de services énergétiques traditionnelles.

De plus, l'ESCO met en place un suivi précis des installations lors de la phase d'exploitation de l'installation. Cela lui permet d'une part, de vérifier que les spécifications préconisées sont respectées dans le cas où la conduite et la maintenance sont sous-traitées, et d'autre part, de mesurer le niveau de performance réellement atteint, ce qui permettra par la suite de calculer le montant de la rémunération versée par le client. Car, la prise en charge de la garantie d'amélioration des performances énergétiques des installations se traduit par la mise en place d'une rémunération du contrat de services énergétiques directement liée au niveau de performance réel des installations. Ainsi, la garantie de résultat associée à la rémunération ne porte plus uniquement sur le respect des spécifications des usages finals mais également sur un niveau de performance à atteindre, défini au préalable. De cette manière, même si le prestataire ne réalise pas lui-même la presta-

tion « achat d'énergie », il supporte l'ensemble des risques liés à la réalisation du projet d'amélioration des performances énergétiques.

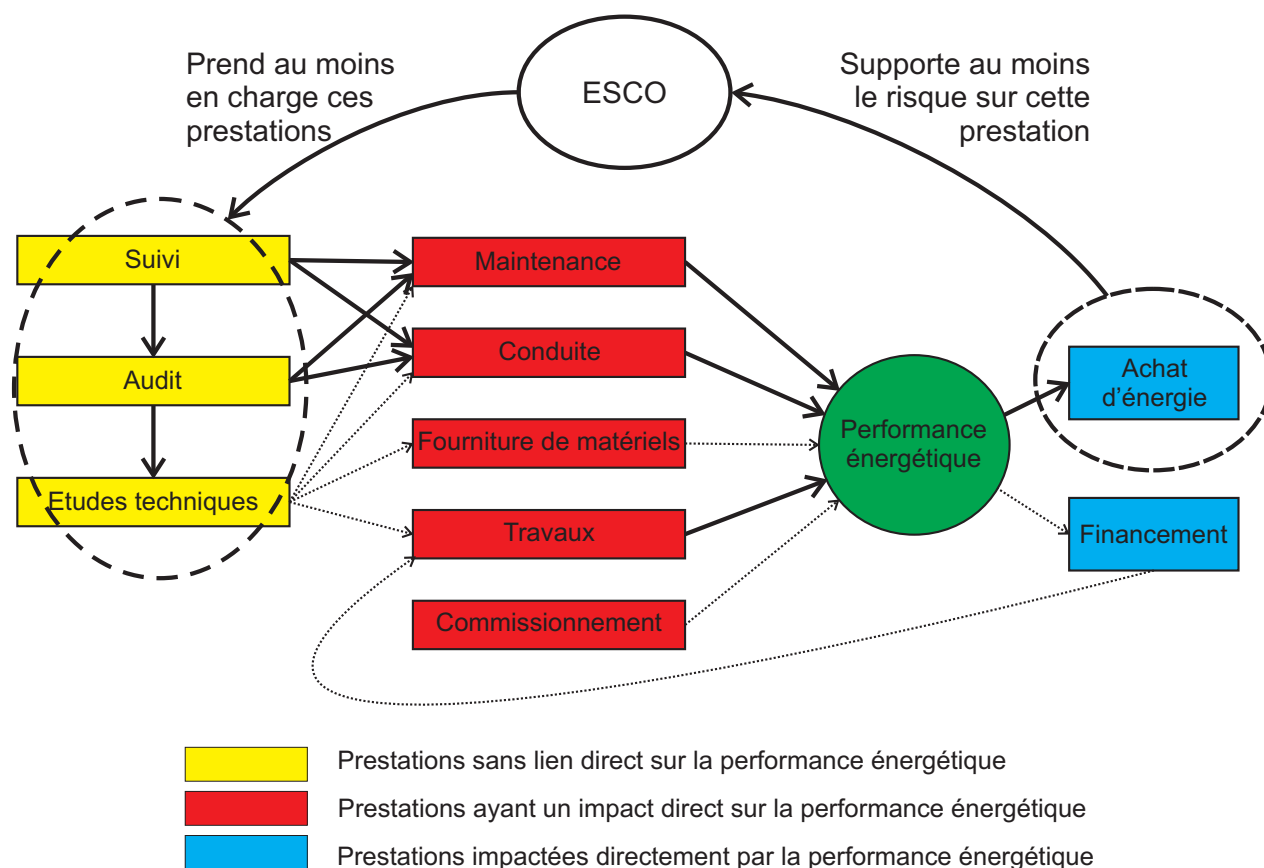


FIG. 3.2 – Prestations prises traditionnellement en charge par une ESCO.

Ainsi, une ESCO prend en charge, les risques liés à la réalisation des travaux qu'il s'agisse du dépassement des coûts de construction ou de la durée des travaux qui retarde d'autant le début de la rémunération du contrat (voir le paragraphe suivant), mais également les risques liés à la réalisation de l'audit énergétique et des études techniques : mauvaise évaluation des performances énergétiques avant et après mise en œuvre du projet d'amélioration.

La contractualisation de cette garantie de résultat sur la performance passe typiquement par la mise en place d'un mécanisme contractuel du type « Contrat de Performance Énergétique » dont nous détaillons le contenu et les étapes de réalisation dans le paragraphe 3.2.4 de ce chapitre. Nous pouvons cependant préciser pour le moment le principe du contrat de performance énergétique à l'aide de sa définition donnée dans la directive européenne relative à l'efficacité énergétique et aux services énergétiques [Directive 2006/32]. Il s'agit d'un « accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, selon lequel des investissements dans cette mesure sont consentis afin de parvenir à un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement défini ».

3.2.2 La question du financement : auto-financement ou financement par l'ESCO

Comme l'illustre la figure 3.2, la prise en charge des prestation « audit », « suivi » et « réalisation d'études techniques » permet, d'après ce que nous avons démontré au chapitre 2.1, de maîtriser les risques de la prestation « Achat d'énergie » et par conséquent de maîtriser la facture énergétique pour le fonctionnement des installations. De cette manière-là, ce type d'engagement permet de fiabiliser la rentabilité d'un investissement, en supprimant le risque technique pour le client. Plus précisément, tout ou partie des coûts de fonctionnement évités permet dans un premier temps de rémunérer les services du prestataire, mais également un éventuel service de financement, avant de profiter totalement au client comme cela est schématiquement représenté sur le figure 3.3.

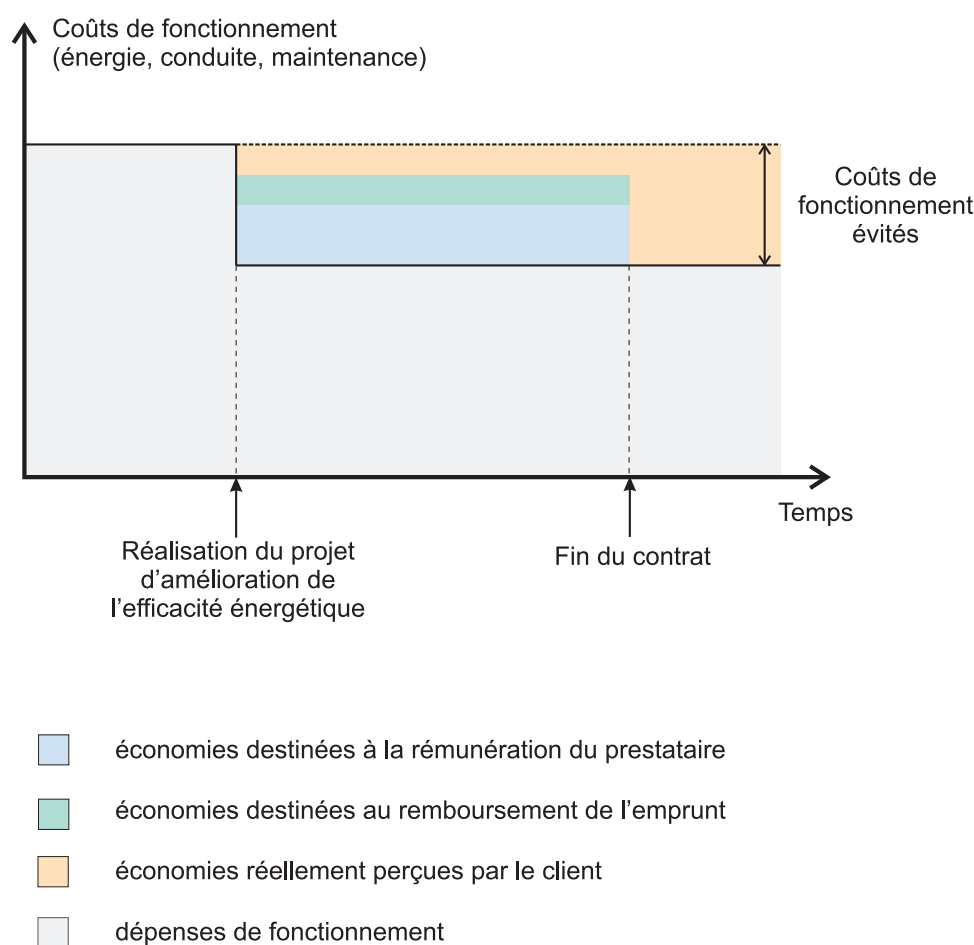


FIG. 3.3 – Illustration de la répartition des économies entre client, prestataire de services énergétiques et prestataire de services de financement dans le cadre d'un contrat de performance énergétique.

Bien entendu, le client peut donc, sur la base de la garantie technique, libérer des marges de manœuvre financière et assurer lui-même le financement du projet, mais dans le cas où le client ne disposerait pas en interne de cette capacité de financement, il peut avoir recours à un organisme de crédit. Dans ce cas-là, il y a un grand intérêt à ce que le

prêt soit alors négocié et financé sur la base de la garantie technique portée par le contrat de performance énergétique, d'autant que le prestataire, tenant de la garantie technique, peut également assister son client dans cette négociation.

Mais l'ESCO peut également prendre en charge le risque financier en proposant le financement des investissements recommandés et spécifiés suite à l'audit énergétique. Cette alternative permet de distinguer deux modèles de contractualisation [CTI, 2003] :

- le modèle « **économies garanties** » (« guaranteed savings ») : dans ce modèle (figure 3.4), l'ESCO assume les risques liés aux études, aux travaux et à la garantie du niveau de performance énergétique, mais le financement du projet est à la charge du client, soit par auto-financement, soit en faisant appel à un organisme de crédit et de financement classique. Les économies d'énergie sont garanties dans le sens où le prestataire dédommage financièrement le client si les performances énergétiques visées ne sont pas atteintes.

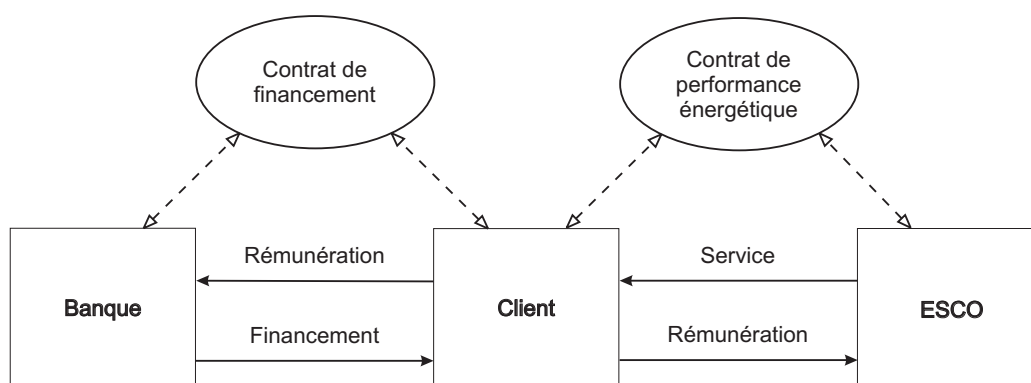


FIG. 3.4 – Schéma du modèle « économies garanties » proposé par les ESCOs.

- le modèle « **économies partagées** » (« shared savings ») : dans le cadre de ce second mécanisme (figure 3.5), l'ESCO prend également en charge le financement de l'investissement, qui apparaît dans les comptes de l'ESCO et non plus du client. Les économies d'énergie ne sont plus totalement garanties par le prestataire mais la rémunération du prestataire correspond à une partie des économies réellement réalisées, dont la proportion est déterminée lors de la mise en place du contrat.

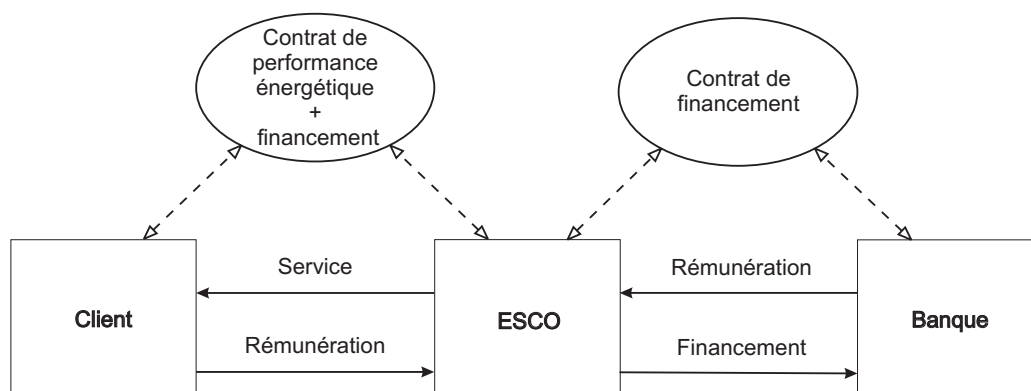


FIG. 3.5 – Schéma du modèle « économies partagées » proposé par les ESCOs.

Finalement, la différence de financeur entre ces deux systèmes fait varier la nature de ce qui est garanti dans un type de contrat ou dans un autre.

Dans le cadre d'un contrat « économies garanties », le prestataire est rémunéré directement par le client sous forme d'annuité dont le montant est calculé au préalable lors de la mise en place du contrat, et correspond à une fraction du volume d'économies d'énergie visé. Si le niveau de performance visé n'est pas atteint, le prestataire doit couvrir le manque à gagner subi par le client. Ainsi, l'ESCO couvre entièrement le risque technique lié à la réalisation du projet, mais n'assure pas la prise en charge du risque financier : la négociation et la contraction d'un éventuel emprunt sont à la charge du client. Les risques liés au financement sont pris en charge par une banque ou un fond d'investissement dans le cadre d'une relation contractuelle classique entre un organisme de crédit et un client.

Dans le cadre d'un contrat « économies partagées », l'ESCO apporte le financement et supporte donc à la fois une partie des risques techniques et l'ensemble des risques financiers. Le client rémunère l'ESCO avec une fraction des économies d'énergie réellement générées par le projet porté par l'ESCO. Nécessairement, la fraction des économies versée au prestataire est plus élevée dans ce type de contrat car elle doit rémunérer à la fois les services fournis par l'ESCO mais également le coût du financement. Enfin, si le niveau de performances visé n'est pas atteint, les surconsommations sont également partagées entre le prestataire et le client.

Ainsi, autant dans le premier type de contrat, le prestataire supporte l'ensemble des risques techniques en garantissant la valeur du volume d'économies d'énergie non réalisées, autant dans le second, le client continue de supporter une partie des risques techniques (cf. tableau 3.1). En revanche, un contrat de type « économies partagées » fait porter l'ensemble des risques financiers sur le prestataire de services, et l'emprunt n'apparaît pas dans les bilans financiers des clients.

Modèle de contractualisation	Acteur prenant en charge les différents risques	
	Risques techniques	Risques financiers
« économies partagées »	prestataire et client	prestataire
« économies garanties »	prestataire	établissement financier

TAB. 3.1 – Partage des risques dans les offres de services énergétiques des ESCOs

Dans ce dernier type de contrat, des dispositions contractuelles sont également prises afin de supprimer les risques liés à la variation des prix. En effet, une augmentation des tarifs augmenterait la rétribution versée par le client à l'ESCO sans pour autant reposer sur une économie d'énergie supplémentaire. Inversement, une baisse des tarifs profiterait au client, tandis que l'ESCO verrait ses revenus diminuer sans que cette diminution soit nécessairement liée à un quelconque manquement de sa part. Pour éviter ceci, un tarif de référence est déterminé lors de la mise en place du contrat et les économies d'énergies sont valorisées à l'aide de ce tarif de référence : la rétribution que le client verse à l'ESCO est donc directement proportionnelle aux économies d'énergie réellement générées.

3.2.3 Le « financement par tiers » : un concept ambigu

Dès que les offres de services énergétiques proposées par les ESCOs sont abordées dans la littérature, le concept de « financement par tiers » est également évoqué. Jusqu'à maintenant, nous n'avons volontairement pas mentionné ce concept car sa définition nous semble relativement ambiguë selon les auteurs.

Le financement par tiers est souvent décrit comme un levier pour favoriser l'amélioration des performances énergétiques [ECS, 2003]. Il peut ainsi être défini comme le financement d'un projet contracté sur la base d'un contrat de performance énergétique et dont la rétribution par le client correspond à une partie des coûts évités grâce à l'amélioration des performances énergétiques. C'est dans le cadre des contrats « économies partagées » qu'est apparu le concept de « financement par tiers », signifiant ainsi simplement le fait qu'un acteur autre que le client ou le prestataire de services énergétiques, intervient dans le montage de projet en proposant un service de financement pour le projet, et accepte de porter une partie du risque financier.

Mais d'un point de vue relativement répandu en Europe, le terme de « tiers » peut désigner plus directement l'ESCO qui est à la fois le prestataire technique et le prestataire financier du point de vue du client. En effet, dans le cadre d'un contrat de type « économies partagées », l'ESCO assure le portage simultané des contrats techniques et financiers, ce qui conduit naturellement à de nombreux contresens, et en particulier à confondre les deux types de contrats qui lient le prestataire à son client. Ainsi, les concepts « financement par tiers » et « contrat de performance énergétique » sont régulièrement utilisés pour désigner un même mécanisme contractuel ([Westling, 2003]), ce qui conduit à comprendre que le financement par tiers porte une garantie technique d'amélioration des performances énergétiques.

Enfin, l'appellation « financement par tiers » devrait être un terme réservé uniquement aux contrats de financement dont les termes ont été négociés et rédigés sur la base d'un contrat de performance énergétique [Bertoldi, 2005]. Comme nous l'avons représenté sur la figure 3.3, les contrats de performance énergétique et de financement associés sont rémunérés grâce aux coûts énergétiques évités. Ainsi le remboursement du financement est guidé par le calendrier d'amélioration des performances des installations.

Par conséquent, tout financement, dont les mensualités ne seraient pas calibrées sur la base d'un contrat de performance énergétique, ne saurait prétendre à la qualification de financement par tiers. Si cette condition d'appellation peut paraître assez restrictive, elle permet toutefois de mettre en évidence que le financement par tiers est un mécanisme qui accepte des temps de retour plus importants que les mécanismes de financement classiques. Il constitue, à ce titre, un levier d'amélioration de la performance énergétique efficace.

Dans ce document, nous ferons la distinction entre le « contrat de performance énergétique » et le « financement par tiers ». Nous souhaitons en effet, faire clairement la distinction entre le contrat de services énergétiques, qui contient les éléments techniques décrivant les objectifs en matière d'économie d'énergie sur lesquels un prestataire s'engage et les solutions et moyens techniques prévus pour atteindre ces objectifs, et le contrat de service de financement proposé par un organisme de crédit s'appuyant sur les éléments

techniques du contrat de performance énergétique mais qui ne porte en aucun cas, à lui seul, la garantie technique d'amélioration des performances énergétiques.

3.2.4 Procédure de mise en place d'un contrat de performance énergétique

Comme nous l'avons signalé précédemment, l'offre de service des ESCOs est basée sur le principe du contrat de performance énergétique. De même, nous avons indiqué que la directive européenne relative aux services énergétiques [Directive 2006/32] proposait d'encadrer ce principe à l'aide de la définition suivante : « accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, selon lequel des investissements dans cette mesure sont consentis afin de parvenir à un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement défini ».

Parallèlement aux travaux des institutions européennes, des travaux réalisés dans le cadre de la tâche X du programme « Demand-Side Management » de l'Agence Internationale de l'Énergie avaient pour but de synthétiser les connaissances en matière de contractualisation de la performance énergétique (« performance contracting ») à travers le monde, et d'en proposer une certaine harmonisation. A l'issue de ces travaux, des recommandations, concernant la démarche de mise en place et le contenu types d'un contrat de performance énergétique ont été émises ([Westling, 2003]).

Une procédure type pour la mise en place d'un Contrat de Performance Energétique comprend cinq phases principales (cf. figure 3.6) :

1. **réalisation d'une analyse préalable** : appelée également « étude de faisabilité », cette phase a pour unique objectif une première évaluation du gisement d'économies d'énergie du site approché et constitue pour le prestataire une première approche dans le but de se voir attribuer le contrat. Le prestataire cherche donc à évaluer rapidement le niveau de performance du site en le comparant, par exemple, à des références connues (bâtiments, équipements, usage et énergie). De la même manière, il estime le potentiel d'amélioration des performances énergétiques des installations sur lequel il pense pouvoir s'engager, ainsi qu'une enveloppe pour le coût des investissements à réaliser. Étant donné qu'il s'agit d'une première approche, le prestataire n'engage pas de moyens très importants pour la réalisation de cette analyse préalable. On peut estimer que cette étude est réalisée en l'espace de quelques jours. La réalisation de cet audit n'engage pas le client qui est libre de ne pas donner suite, et de sortir de la procédure.
2. **réalisation d'une analyse détaillée** : suite aux premiers chiffrages fournis par le prestataire, le client peut décider de poursuivre la procédure avec la phase d'analyse détaillée. Durant cette phase, le prestataire approfondit le bilan énergétique de l'analyse préalable et recherche les solutions qu'il est possible de mettre en œuvre. Le potentiel d'économies d'énergie de chaque solution ou d'un ensemble de solutions doit être chiffrer de manière précise, et une analyse technico-économique doit accompagner la description de ces solutions. Enfin, le prestataire devra également présenter les données financières du projet et notamment le montage contractuel

prévu pour sa réalisation. A l'issue de cette étape, le client peut décider d'entrer dans une phase de négociation et de contractualisation, ou de nouveau décider de sortir de la procédure. Il faut toutefois noter qu'il est courant que le prestataire soit dédommagé pour la réalisation de cette étude même dans le cas où le client décide d'abandonner car les moyens mis en œuvre peuvent être assez importants : on peut estimer que cette étude est réalisable en l'espace de quelques semaines.

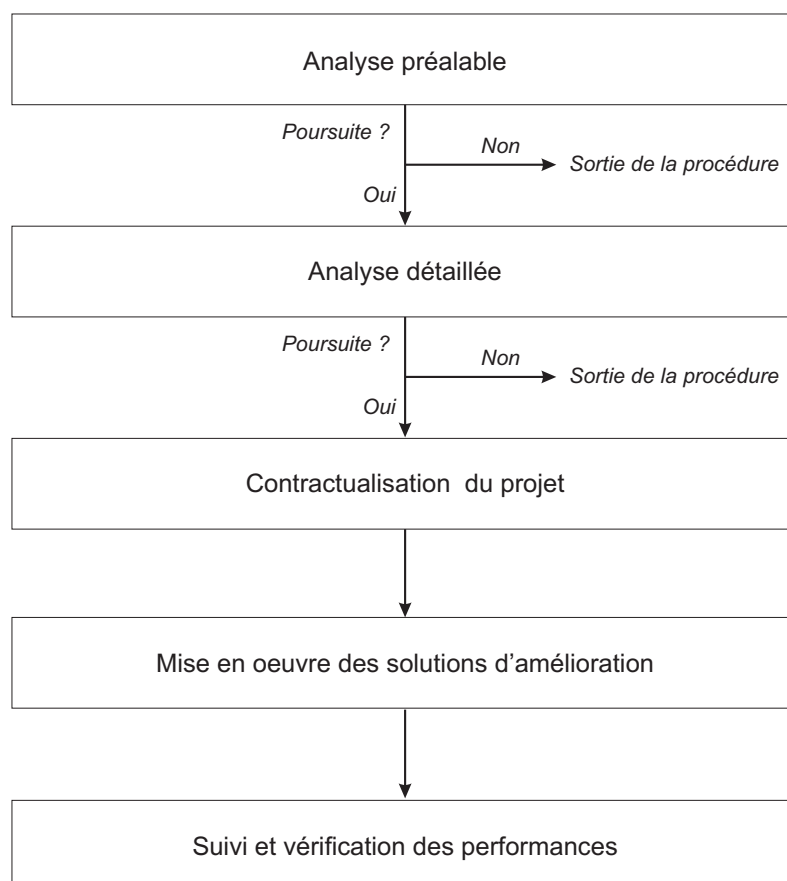


FIG. 3.6 – Procédure type pour la mise en place d'un Contrat de Performance Energétique.

3. **contractualisation du projet** : cette phase de négociation entre parties est destinée à élaborer les engagements de chaque partie. La description des mesures choisies pour améliorer les performances énergétiques du site est finalisée. Le niveau de performance de référence du projet et l'objectif d'amélioration sont précisés ainsi que les modalités de rémunération du prestataire. C'est à ce stade que sont élaborés les indices de suivi des performances ainsi que les méthodes de calcul des économies d'énergie, que nous détaillerons dans le chapitre 5.
4. **mise en œuvre des solutions d'amélioration** : durant cette phase, tous les travaux définis lors de la phase précédente sont réalisés. Le prestataire s'assure que les performances des équipements installés correspondent bien aux spécifications prévues lors de leur mise en route.

-
5. **suivi et vérification des performances** : pendant la phase d'exploitation des installations, le prestataire et le client contrôlent mutuellement l'évolution des performances des installations. Pour cela, les deux parties mettent en œuvre les protocoles de mesure et de vérification des performances énergétiques des équipements, des installations ou du site en entier, qui ont été définis lors de la phase de contractualisation. Cette phase est bien entendu destinée principalement à assurer l'exercice de la garantie sur l'amélioration des performances et par suite à déterminer la rémunération du prestataire.

Le contrat est donc rédigé sur la base des analyses préalable et détaillée. Il précise principalement les éléments suivants :

- la description précise des mesures prévues pour l'amélioration des performances énergétiques ;
- les éléments permettant de justifier les solutions retenues d'un point de vue technico-économique ;
- les garanties de résultats (sur les économies d'énergie, la maintenance, la conduite, les investissements consentis, etc.)
- les modalités financières de rémunération (par exemple, le pourcentage d'économie d'énergie sur lequel sera rémunéré le prestataire) ou la description du portage financier (dans le cas où le prestataire assure également le volet financier de l'investissement), la durée de l'engagement contractuel et les clauses de révision ;
- la description des moyens et des indicateurs nécessaires pour la vérification et la mesure des résultats réellement obtenus : scénario de référence, paramètres d'ajustement (par exemple, le climat extérieur, l'occupation du site), éléments de calcul permettant de vérifier les garanties.

La procédure de mesure des paramètres et les méthodes de calculs nécessaires à l'édition de ces indicateurs doivent être explicitées. Cette étape de mesure et de vérification est bien entendu indispensable pour vérifier les engagements de garantie du prestataire, mais est également la base de la rémunération du contrat fondée sur l'amélioration réelle des performances énergétiques des installations.

3.2.5 La contractualisation de la performance énergétique

Ainsi que nous venons de le voir, les contrats de performance énergétique sont des contrats de services énergétiques visant l'amélioration des performances énergétiques des installations. La mise en place de ce type de contrat nécessite donc que les parties s'accordent sur la définition d'une méthode contractuelle permettant de rendre compte de l'amélioration réelle des performances de l'installation. Cette méthode doit également permettre de déduire, à partir du suivi de l'amélioration des performances des installations, le montant d'économies d'énergie attribuable au projet d'amélioration. Or, les économies d'énergie ne sont pas directement mesurables puisque, par définition, elles correspondent à une absence de consommation, donc à l'absence d'une grandeur physique, entre deux situations : le fonctionnement des installations concernées avant puis après la réalisation du projet d'amélioration.

De plus, la comparaison directe des performances des installations avant et après réa-

lisation du projet d'amélioration des performances énergétiques ne suffit pas pour évaluer les économies d'énergie réelles. En effet, il est relativement rare que la consommation d'énergie d'une installation soit constante dans le temps : de nombreux facteurs variables (climat, activité de production pour les sites industriels, occupation pour les immeubles de bureaux ou les logements) induisent des variations de consommation d'énergie dans le temps. Afin d'évaluer correctement les économies d'énergie, il est donc nécessaire d'établir une méthode d'ajustement qui permettra de corriger les consommations d'énergie mesurées de la variation de ces facteurs, de manière à comparer les consommations d'énergie d'une installation dans des conditions de fonctionnement identiques (cf. illustration sur la figure 3.7). Pour cela, on va chercher à identifier les facteurs déterminants de la consommation d'énergie, puis à déterminer les relations entre la consommation du site et les variations de ces facteurs déterminants durant une période de mesure.

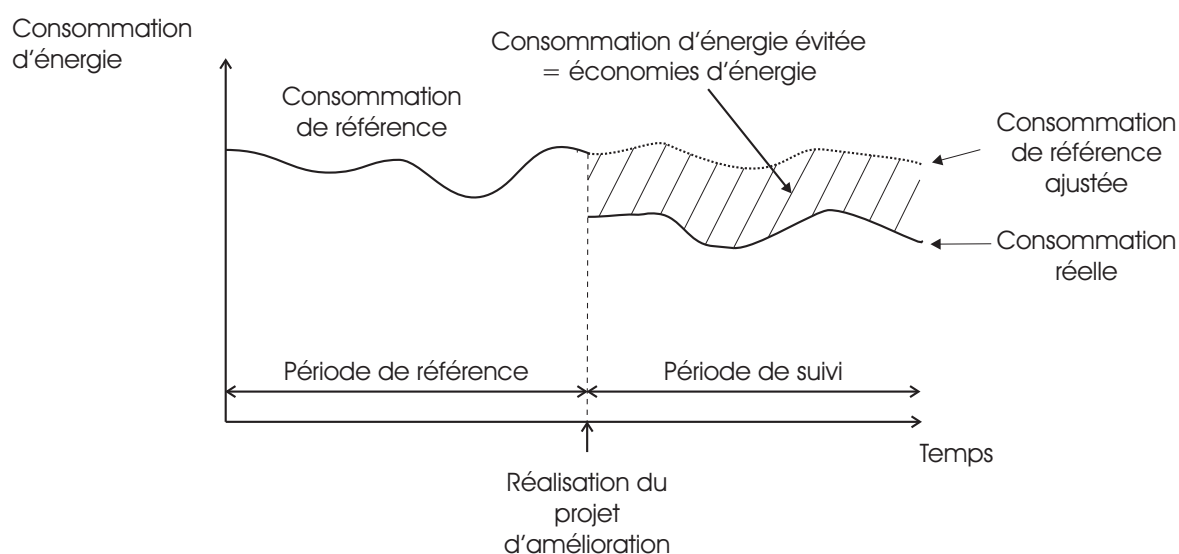


FIG. 3.7 – Illustration du principe d'évaluation des économies d'énergie réalisées dans le cadre d'un contrat de performance énergétique.

Les économies d'énergie générées par la réalisation d'un projet d'amélioration des performances énergétiques seront donc déterminées à l'aide de l'équation générale suivante :

$$\text{économies} = \text{conso}_{\text{réf}} - \text{conso}_{\text{suivi}} + \text{ajustement} \quad (3.1)$$

avec :

- *économies* [kWh] : les économies d'énergie réalisées sur une période dite « de suivi », après la réalisation du projet ;
- *conso_{réf}* [kWh] : la consommation d'énergie du site mesurée pendant une période dite « de référence » avant la réalisation du projet ;
- *conso_{suivi}* [kWh] : la consommation d'énergie du site mesurée pendant une période dite « de suivi » sur laquelle est réalisée l'évaluation des améliorations ;
- *ajustement* [kWh] : les ajustements de consommation à des conditions de fonctionnement communes aux phases de référence et de suivi.

Les termes de cette équation sont explicités dans le contrat ainsi que la procédure à suivre pour leur détermination, qui s'appuiera naturellement sur un protocole d'évaluation des économies d'énergie dont les principes sont exposés au chapitre 5. C'est sur les résultats de ce protocole que s'exerce la garantie de résultat du contrat de performance énergétique associé au projet d'amélioration, ce qui fait de ce protocole la clef de voûte du contrat de performance énergétique.

3.3 Etudes de cas

De nombreux prestataires proposent des contrats de services énergétiques avec des objectifs de performance énergétique. En nous appuyant sur des études de cas réels, nous allons présenter le type d'offres de services énergétiques comportant des clauses de garantie de résultat qui sont couramment proposées par les prestataires de services énergétiques. Nous verrons notamment que, d'une part, ces offres de services énergétiques ne sont pas à proprement parler des contrats de performance énergétique au sens présenté dans cette partie, et que d'autre part, certaines offres nécessitent le développement d'outils techniques fiables afin de mettre en place la contractualisation de la performance. Ces deux études de cas ont été réalisées dans le cadre d'une étude sur les services énergétiques dans la grande distribution [Perifem, 2005]. Il s'agit donc d'offres de services énergétiques en direction d'un secteur d'activité particulier, celui de la grande distribution, qui représente 4,5 % de la consommation d'électricité en France (20 *TWh*).

3.3.1 Etude de cas n°1

Contexte

Le site concerné par l'offre de service est composé d'un hypermarché de 15 000 m^2 et d'une galerie marchande occupée par une soixantaine de boutiques (d'une surface totale de 25 000 m^2). L'hypermarché se compose d'une surface de vente (9 500 m^2), de laboratoires et de réserves (4 000 m^2) et des locaux administratifs et techniques (1 500 m^2). La consommation de ce site en électricité et en gaz est de 7 311 *MWh* pour l'hypermarché et de 878 *MWh* pour la galerie marchande.

Au moment où a lieu la mise en place du contrat de services énergétiques décrit dans cette étude de cas, le gestionnaire du site souhaite faire jouer l'éligibilité du site pour obtenir un contrat de fourniture d'électricité à un prix avantageux. En effet, le gestionnaire souhaite profiter de la baisse des prix de l'électricité sur le marché des énergies, à cette époque, plus avantageux que le tarif régulé par les pouvoirs publics. Il est donc approché par un fournisseur d'électricité qui formule une offre de services énergétiques proposant une tarification de l'électricité inférieure au tarif régulé assorti d'une prestation visant à réduire les consommations d'énergie du site. La mise en place de ce contrat suit les étapes décrites précédemment dans cette partie pour la mise en place d'un contrat de performance énergétique.

Etude de faisabilité et audit énergétique

L'étude de faisabilité est réalisée au frais du prestataire pour un montant de 3 000 € et met en évidence un potentiel d'économies d'énergie de 250 *MWh*. Ce potentiel d'économie d'énergie repose sur une meilleure gestion des unités de toiture (optimisation de la relance et free-cooling), équipement destiné à la régulation de l'ambiance thermique des locaux. Cette gestion optimisée doit également permettre de lisser la courbe de charge du site, et donc d'abaisser la puissance souscrite dans le contrat de fourniture par rapport au contrat antérieur. La réduction de la puissance souscrite et les économies d'énergie attendues permettent de réaliser environ 15 000 €HT d'économie sur la facture annuelle d'énergie.

L'audit énergétique approfondit les pistes d'amélioration et cherche également de nouvelles sur les équipements fonctionnant au gaz. Au final, cet audit propose les améliorations suivantes pour l'ensemble du site :

- gestion des unités de toiture : gestion de la relance matinale et free-cooling ;
- gestion des rideaux d'air chaud : arrêt du fonctionnement nocturne et asservissement à la température extérieure ;
- éclairage : le zoning de l'éclairage est revu et adapté à la configuration actuelle de la grande surface ;
- fours de boulangerie : l'arrêt de ces équipements est réalisé de façon progressive.

Cet audit chiffre alors le potentiel d'économies d'énergie de la manière suivante :

Énergie	Économie d'énergie en <i>MWh</i>	Économie sur la facture en €HT
Électricité	344	21 000
Gaz	285	5 800
Total	629	26 800

Les économies sont valorisées sur la base de la grille tarifaire qui s'appliquait au site avant la formulation de cette offre de services énergétiques. Les économies d'énergie représentent au final 7,7 % de la consommation d'énergie du site, et 6,7 % du montant de la facture énergétique.

Contractualisation

Sur les bases de l'audit énergétique, le prestataire de services formule une offre définitive de services énergétiques comprenant :

- la fourniture d'électricité sur 3 ans, à un tarif progressif défini à la signature du contrat ;
- la mise en place d'un système de GTB pour un montant de 32 550 €HT, pris en charge par le client ;
- la prise en charge de la gestion à distance de l'installation par un second prestataire, partenaire du premier ;
- une garantie de réduction de la facture énergétique de 21 000 €HT par an, progressive également, représentant environ 5.5 % de la facture énergétique.

Le client doit verser une partie des économies réalisées sur la facture énergétique afin de rembourser le prestataire du montant de l'audit énergétique.

Analyse de la structure du contrat

Contrairement aux contrats de chauffage présentés dans cette première partie, cette offre de service est portée par un fournisseur d'énergie et non par un exploitant d'installation. Cette offre se structure tout naturellement autour d'une prestation « achat d'énergie » pour l'ensemble des installations du site consommant de l'électricité. La portée de cette prestation s'étend donc de fait sur l'ensemble du site.

En revanche, la portée du reste de l'offre de services énergétiques est plus modeste, puisqu'elle ne concerne que quelques équipements de distribution d'énergie utile pour la climatisation, l'éclairage et, en partie, le chauffage. Sur ces équipements de distribution, le prestataire prend en charge la prestation « suivi » et une partie de la prestation « conduite ». En effet, l'offre de service consiste à optimiser, à partir du suivi à distance des données réelles de fonctionnement, la conduite de quelques installations, pour la plupart de distribution d'énergie utile, tout en laissant la réalisation effective de cette conduite au client, qui n'a pas choisi d'externaliser cette prestation. De même, le client doit assurer la maintenance de ces équipements afin de permettre leur fonctionnement dans des conditions prévues contractuellement avec le prestataire. Ainsi, ce contrat a une structure similaire aux marchés typiques d'exploitation des installations désignés « Combustible Prestation » décrits dans la partie 2.2, bien que son contenu soit dépourvu de la prestation « maintenance ».

Enfin, le prestataire assortit à son offre une garantie de résultat sur la facture énergétique. On observe tout d'abord que, si cette garantie porte sur l'ensemble de la facture énergétique, son montant a été calculé sur le potentiel d'économies d'énergie électrique uniquement. Le prestataire prend là une mesure conservatrice, car il ne maîtrise pas les tarifs du gaz contrairement à l'électricité. Cependant, rien n'empêche qu'une partie des économies soient réalisées sur les équipements fonctionnant au gaz. Étant lui-même fournisseur d'électricité, le prestataire aurait même tout intérêt à réaliser les économies d'énergie sur ces équipements fonctionnant au gaz. On précisera pour finir qu'un intervalle de 10 % autour de l'objectif d'économie sur la facture a été prévu : en deçà de cet objectif moins 10 %, le prestataire devra procéder au remboursement du client, tandis que les économies supplémentaires à l'objectif plus 10 % seront partagées entre les parties. La structure de ce contrat est donc très proche du contrat type « Combustible Prestation » assorti d'une clause d'intéressement.

Analyse de l'efficacité énergétique portée par le contrat

Comme nous l'avons montré dans la partie 2.2, l'efficacité énergétique portée par un contrat de type « Combustible Prestation » est modeste, et la garantie de résultat n'a qu'un rôle de garde-fou. Dans une perspective d'amélioration de l'efficacité énergétique, ce contrat n'est pas vertueux dans le sens où le prestataire n'a aucune incitation à dépasser son objectif : chaque kilowattheure économisé supplémentaire, donc non vendu, n'est valorisé qu'en partie puisque les parties doivent partager les économies supplémentaires, et seulement à condition d'avoir dépassé l'objectif de 10 %. Ceci montre bien que l'amé-

lioration de l'efficacité énergétique n'est pas le moteur principal du contrat, contrairement au principe du contrat de performance énergétique décrit précédemment dans cette partie.

Il n'est cependant pas évident de comparer les gains ou bénéfices pour ce prestataire fournisseur d'énergie en cas de dépassement ou de non atteinte de l'objectif, car la valorisation des économies, sur laquelle repose la garantie, est réalisée au tarif constant de l'année précédent la mise en place de ce nouveau contrat, tandis que le prix de vente du kilowattheure a évolué avec ce nouveau contrat de fourniture. Cette garantie de résultat sur la facture énergétique semble donc davantage relever d'une offre commerciale sur un contrat de fourniture d'électricité que d'un contrat visant à l'amélioration des performances énergétiques des installations. D'ailleurs, du point de vue commercial, cette offre de services énergétiques correspond bien aux attentes des gestionnaires, en particulier de grande surface, qui souhaitent maîtriser leur budget de fonctionnement, notamment sur les postes annexes à leur coeur de métier.

Enfin, on peut s'étonner des améliorations proposées par le prestataire, car on constate qu'il s'agit de mesures dont on s'attendrait, pour une partie d'entre elles, qu'elles soient déjà en vigueur dans la gestion de l'installation. En effet, qu'il s'agisse de l'arrêt du fonctionnement nocturne des rideaux d'air chaud ou des fonctionnements contradictoires des unités de toiture, près de la moitié du potentiel d'économies d'énergie relève de la bonne gestion qui aurait pu être mise en œuvre par un exploitant classique. Cependant, l'expérience montre par ailleurs que les principes de bonne gestion les plus élémentaires sont régulièrement oubliés.

3.3.2 Etude de cas n°2

Contexte

Le site concerné par l'offre de service que nous décrivons et analysons ici est composé d'une grande surface de 17 600 m^2 et d'une galerie marchande de 10 500 m^2 . Un prestataire exploite déjà les installations techniques du site : il assure notamment la maintenance préventive et corrective et le suivi des installations. Ces prestations sont rémunérées forfaitairement. Les gestionnaires du site souhaitent réduire les charges dues à la facture énergétique, tandis que dans le même temps, le prestataire propose d'enrichir le contenu de son offre de services énergétiques.

Si l'analyse des factures permet d'établir les consommations d'électricité globales respectives de l'hypermarché et de la galerie marchande à respectivement 5 947 MWh et 1 227 MWh , la décomposition des consommations poste par poste ne peut pas reposer sur un quelconque sous-comptage, inexistant : elle est donc réalisée en analysant les courbes de charges globales du site.

Le prestataire a pu ainsi répartir les volumes de consommations électrique de la manière indiquée sur les figures suivantes :

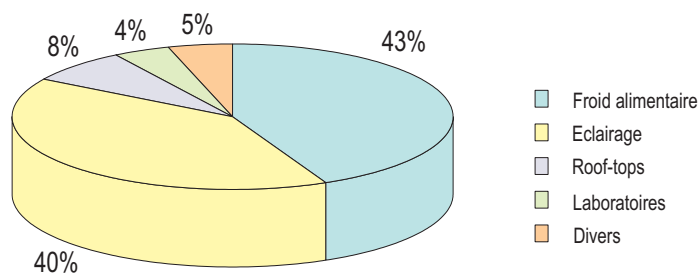


FIG. 3.8 – Répartition de la consommation d'énergie de l'hypermarché.

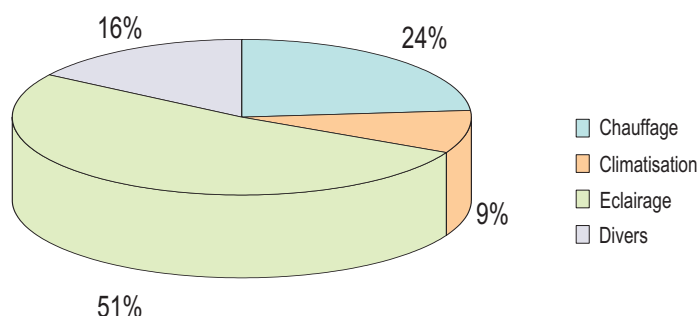


FIG. 3.9 – Répartition de la consommation d'énergie de la galerie marchande.

Enfin, il faut noter qu'au moment où le prestataire débute la démarche de mise en place de ce nouveau contrat, le client l'informe des projets d'extension du site mais ne souhaite pas attendre pour mettre en place ce contrat destiné à réduire ses dépenses d'exploitation.

Etude de faisabilité et audit énergétique

La mise en place de ce nouveau contrat suit la procédure classique d'un contrat de performance énergétique : le prestataire prend à sa charge la réalisation d'une étude de faisabilité, qui est ensuite approfondie par un audit énergétique sous réserve de l'accord du client. L'étude de faisabilité est réalisée par un prestataire externe pour un montant de 3 200 € et met en évidence des sources d'économies, la plupart du temps grâce à une amélioration de la gestion des équipements existants. Les systèmes de gestion en place sont pour la plupart soit défectueux, soit inexistantes. De plus, bien que représentant un poste de consommation important, il n'est pas prévu de mettre en place des actions sur le froid alimentaire, car le client ne souhaite pas intégrer la rénovation des meubles frigorifiques, pourtant prévue quelques mois plus tard et qui sera donc réalisée par un autre prestataire.

Après accord de principe du client, l'audit énergétique approfondit les pistes d'amélioration mises en évidence par l'étude de faisabilité, et permet également de définir un profil de référence sur la base duquel sera calculée l'économie contractuelle réalisée.

Les pistes d'amélioration formalisées à la suite de cet audit sont les suivantes :

- unités de toiture : gestion de la relance, modulation du taux d'air neuf et gestion du free-cooling ;
- éclairage : gestion du zoning et asservissement partiel à la luminosité extérieure ;
- laboratoires : gestion améliorée des extracteurs ;
- fours de boulangeries : gestion améliorée des phases de démarrage et d'arrêt des fours ;
- rideaux d'air chaud : régulation selon la température extérieure.

Nous pouvons observer qu'il s'agit de pistes d'amélioration similaires à celles qui ont été mises en œuvre dans la première étude de cas que nous avons analysée. Cependant, le potentiel d'amélioration est légèrement plus important puisqu'il s'élève, pour l'ensemble du site, à 713 *MWh*, ce qui représente 9 % de la consommation totale du site. Cette économie est valorisée sur la base du tarif de l'année de l'étude et, compte tenu des réductions d'abonnement prévues (environ 100 *kW*), sont valorisées à 32 700 €HT, représentant environ 10 % de la facture énergétique globale.

Contractualisation

La mise en œuvre des économies supposant un système de conduite adapté à la gestion d'énergie, la solution proposée est basée sur la mise en place d'un outil de suivi commun à l'hypermarché et à la galerie marchande, conçu pour pouvoir être scindé si nécessaire. Le chiffrage est réalisé par un partenaire du prestataire, susceptible de fournir le système décrit dans l'audit et de s'engager sur le résultat final. L'investissement global d'un montant de 98 200 €HT est intégré dans l'offre de services du prestataire et est associé à une garantie d'économies sur la facture énergétique de 31 000 €HT sur la base d'une valorisation des économies à tarif constant (le tarif de l'année de l'audit étant pris comme base de calcul). La garantie de résultat, portée par le prestataire envers ses deux clients, est couverte par un engagement du partenaire, fournisseur du système de gestion, à travers un contrat de télégestion d'un montant 4 120 €HT par an.

Bien que le système de gestion soit fourni et mis en œuvre par un partenaire du prestataire, le client continue à n'avoir qu'un seul interlocuteur en la personne du prestataire. Les éléments concernant ce système de gestion sont contractualisés entre le prestataire et son partenaire, mais c'est bien le prestataire qui sera le porteur contractuel de la garantie vis-à-vis du client.

Enfin, le contrat comporte les règles de calcul du profil de référence sur la base duquel est calculée l'économie contractuelle : c'est sur la valeur de cette économie après sa valorisation à tarif constant que repose la garantie portée par le prestataire. Nous n'avons pas eu accès aux détails de ce mode de calcul, et n'avons obtenu que son principe. Ainsi, s'agissant d'un site mono-énergie, les éléments du contrat précisent que les factures électriques seront décomposées en trois parties :

- la puissance souscrite en *kW* (puissance réduite calculée) ;
- les consommations d'énergie en *kWh* ;
- les éventuels dépassements en *kW*.

Les économies sont calculées mensuellement, de la façon suivante :

-
1. le gain sur la prime fixe est calculé par la différence entre la puissance réduite de l'année référence et la puissance réduite du mois en cours, l'économie étant égale à la différence, valorisée en €HT au tarif de l'année référence ;
 2. les consommations chauffage (en *kWh*) sont isolées par déduction de la part non climatique indiquée dans le contrat, éventuellement corrigée en cas d'évolution ;
 - en hiver, les consommations captives en heures de pointe sont réparties au prorata temporis entre les heures pleines et les heures pointes ;
 - pour tenir compte des variations climatiques, les consommations chauffage, après déduction des consommations captives, sont corrigées à l'aide des degrés-jours unifiés mensuel par tranche tarifaire ;
 - la somme des consommations captives et des consommations chauffage corrigées est valorisée en €HT par tranche tarifaire, au tarif de l'année référence ;
 - le gain est égal à la différence entre cette somme et la consommation en €HT du mois référence ;
 - cette comparaison est réalisée mensuellement, la correction par les degrés-jours unifiés n'étant faite que pendant la saison de chauffage effective.
 3. les éventuels dépassements quadratiques (en *kW*) enregistrés dans le mois sont valorisés au tarif de l'année référence, l'économie en €HT étant égale à la différence entre le mois en cours et le mois de référence
 4. le gain total, à exploitation et conditions tarifaires identiques, est la somme en euros hors taxes des gains sur la prime fixe, les consommations et les dépassements ;
 5. le calcul étant réalisé mensuellement, le résultat est globalisé en fin d'année contractuelle.

Il s'agit donc d'un engagement sur la facture énergétique (à tarif constant), et non uniquement sur le volume consommé, ce qui laisse la place à une optimisation de la capacité nécessaire au site, en plus d'une optimisation sur le volume d'énergie consommée. Par ailleurs, on pourra remarquer que, bien qu'il s'agisse d'un site climatisé, il n'y a pas de correction en fonction des conditions climatiques en été.

De plus, le contrat contient des clauses de révision du contrat en cas d'ajout ou de suppression d'équipements, de la modification des conditions d'occupation ou d'exploitation. Le cas échéant, il est prévu de recalculer la garantie d'économies en fonction des évolutions, sans pour autant rompre le contrat. Nous n'avons pas eu accès à la méthode de recalcul de la garantie.

Analyse de la structure du contrat

Le contenu du contrat n'évolue pas par rapport à la situation antérieure et se limite aux prestations déjà existantes auparavant : maintenance corrective et préventive, conduite et suivi des installations. Toutefois, ces deux dernières prestations sont renforcées par l'apport technologique et le savoir-faire d'un partenaire du prestataire. La portée du contrat n'évolue pas non plus.

Les modalités de rémunération évoluent toutefois partiellement. En effet, la rémunération des prestations de maintenance, de conduite et de suivi sont toujours rémunérées forfaitairement, mais la mise en place de la garantie budgétaire permet d'introduire une

part variable indexée sur l'écart entre l'objectif et le résultat réel. De la même façon que dans l'étude de cas précédente, un intervalle de 5 % a été établi autour de l'objectif. Il est ainsi prévu un partage des économies si le résultat dépasse l'objectif de 5 %, tandis qu'en cas d'échec, le prestataire devra rembourser le client de l'écart entre le résultat réel et 95 % de l'objectif.

Ainsi, on peut conclure que la structure de ce contrat est semblable à celle des contrats de type « Prestation Forfait » utilisés dans le cadre des marchés d'exploitation des installations de chauffage, assorti d'une clause d'intéressement aux économies d'énergie.

Analyse de l'efficacité énergétique portée par le contrat et retour d'expérience

Nous ne référons pas l'analyse de l'efficacité énergétique portée par ce contrat, puisque nous avons identifié sa structure comme étant identique à un contrat de type « Prestation Forfait » (cf. partie 2.2). Nous rappelons que l'introduction d'une clause d'intéressement aux économies d'énergie est une disposition vertueuse car elle permet d'impliquer le prestataire dans l'amélioration des performances énergétiques des installations alors que le contrat antérieur incitait d'avantage au laisser-aller.

Cependant, le bilan est plus contrasté suite au compte rendu réalisé sur site un an après la mise en œuvre du contrat. En effet, durant la première année du contrat, et comme cela avait été annoncé par client, le site a fortement été remanié. En ce qui concerne l'hypermarché, les meubles frigorifiques ont été remplacés et la puissance installée a été augmentée. De même, de nouveaux groupes frigorifiques ont été installés, tandis que les fours de boulangerie sont désormais alimentés en gaz. Ces transformations se soldent donc par une augmentation de la puissance installée de près de 200 *kW*. En ce qui concerne la galerie marchande, un nouveau parking a été implanté, ce qui s'est traduit par une augmentation des équipements installés pour l'éclairage et les ascenseurs.

Afin de tenir compte de ces modifications, le prestataire a eu recours aux clauses prévues dans le contrat. Ainsi, la consommation de ces nouveaux équipements a été estimée à 1 870 *MWh* pour l'hypermarché, ce qui représente une augmentation substantielle de la consommation du site de 30 %. Pour la galerie marchande, le nouveau profil de consommation de référence s'établit à 1 587 *MWh*.

Le compte-rendu de la première année de contrat fait donc état :

- d'une augmentation de 23 % de la consommation sur la base du profil antérieur à l'agrandissement du site ;
- d'une baisse de 6 % si l'on considère le profil recalculé.

Nous pouvons donc remarquer que l'objectif de réduction (environ 10 %) n'est pas atteint. Cependant, cet écart peut provenir soit d'une mauvaise installation du dispositif de gestion, soit de son utilisation, ou encore d'un mauvais mode de recalcul du profil de référence. En d'autres termes, l'écart vient soit de l'incapacité de l'attelage prestataire-partenaire à remplir les objectifs, soit d'une mauvaise rédaction du contrat. Les éléments dont nous disposons ne permettent pas de privilégier l'une ou l'autre des hypothèses précédentes.

Les installations de la grande distribution évoluent très vite pour s'adapter aux objectifs commerciaux : le profil de référence est donc rarement stable. Notons que ce calcul est indispensable pour établir une comparaison objective puisque les économies sur la facture énergétique contractuellement garanties sont évaluées à tarif constant et que l'engagement contractuel porte sur la facture énergétique (et non sur le volume consommé), alors que d'un point de vue strictement comptable, le changement de tarif a provoqué une hausse de 23 % de la facture énergétique.

Il semble tout de même que les évolutions imposées au site et représentant une augmentation de 30 % de la consommation du site avant intervention, sont vraisemblablement à l'origine de l'écart avec l'objectif annoncé. La méthode d'adaptation du profil de référence pourrait bien entendu être discutée mais nous ne disposons pas de l'ensemble des éléments pour la détailler et la discuter. Nous pourrions par exemple nous demander si la consommation des nouveaux équipements a été estimée à partir des consommations des équipements existants (sur la base de l'augmentation relative de la puissance installée) et prenant donc en compte un certain degré de vétusté, ou si cette consommation a été estimée à partir de données constructeurs, c'est-à-dire en considérant des performances optimales d'équipements neufs. Dans le premier cas, la méthode de calcul permettrait d'augmenter la consommation de référence, et par conséquent de gonfler artificiellement le potentiel d'économie d'énergie disponible sur ce site, sans pour autant modifier l'objectif de réduction de consommation, ce qui constitue une situation favorable au prestataire.

3.3.3 Bilan sur les études de cas

Les deux exemples de services énergétiques que nous venons d'analyser reposent en grande partie sur une amélioration des prestations de conduite des installations, qui est elle-même portée par une amélioration du suivi des conditions de fonctionnement des installations. Nous pouvons également souligner que les actions portent d'abord sur la réduction ou sur la maîtrise de la facture énergétique, c'est-à-dire que la limitation des dépassements de puissance et des pénalités associées sont ciblées dans ces deux contrats, en plus des volumes d'électricité consommée. Cependant, autant dans le premier cas, nous sommes bien en présence d'une maîtrise totale du budget puisque le prestataire maîtrise les tarifs de fourniture d'énergie, autant dans le deuxième cas, il s'agit d'une optimisation de la facture énergétique comparée à une situation antérieure, mais qui ne garantit pas une baisse réelle des factures. D'ailleurs, c'est bel et bien une hausse de la facture énergétique qui est observée dans ce second cas, a priori à cause de l'extension du site.

La maîtrise de la facture énergétique, constatée par la baisse du volume de l'énergie consommée, est majoritairement due à la conduite de l'installation, et donc au savoir-faire des exploitants qui gèrent le site quotidiennement. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité énergétique qui semble résulter de la mise en œuvre de ces contrats n'est donc a priori pas totalement pérenne puisqu'elle n'est pas due uniquement à la mise en place d'appareils efficaces dans lequel un investissement a été consenti en début de contrat mais provient davantage du savoir-faire de l'exploitant. Dans la première étude de cas, bien que le client assure lui-même la conduite de l'installation, nous ne savons pas dans quelle mesure les stratégies de conduite optimisée transmises par le prestataire sont reproductibles par le

client une fois que le contrat sera arrivé à échéance. En sortie du contrat, le propriétaire de l'installation perdra une partie des économies à moins de poursuivre la collaboration avec le même prestataire.

Enfin, on notera que les économies réelles sont peu visibles, notamment dans la deuxième étude de cas, à cause de la modification importante du site, et parce que nous ne n'avons pas pu avoir accès à la méthode de recalcul du profil de référence. Pour un observateur extérieur au contrat, les économies générées sont difficilement vérifiables a posteriori à cause de l'absence d'un système de sous-comptage. De même, hormis la méthode d'indexation des consommations dites « climatiques » par le nombre de degrés-jours, les méthodes d'indexation des autres usages ne sont pas aussi largement répandues, ou restent la propriété de prestataires sans que le client ne soit en mesure de se procurer les éléments de comparaison indispensables à une analyse contradictoire du contenu des offres de services énergétiques.

Chapitre 4

Intégration des contrats de performance énergétique dans les outils de commande publique

Dans l'article 5 de [Directive 2006/32], les Etats Membres sont invités à veiller « à ce que le secteur public joue un rôle exemplaire ». Pour cela, ils doivent mettre en œuvre au moins deux mesures parmi les six présentées dans l'annexe VI de la même directive. La première de ces mesures, qui nous intéresse plus particulièrement, impose au secteur public l'« obligation d'utiliser les instruments financiers visant à réaliser des économies d'énergie, notamment les contrats de performance énergétique stipulant les économies d'énergie mesurables et prédéterminées à fournir (y compris dans les cas où les administrations ont externalisé leurs responsabilités) ».

Lors de la description du concept du contrat de performance énergétique au chapitre 3, nous avons vu que ce type contrat suppose un investissement initial dans un projet d'amélioration dont le remboursement est rentabilisé grâce aux économies réalisées. Ceci a pour conséquence que la rémunération du contrat et donc le montant du remboursement sont variables à chaque échéance, soumis aux aléas de la performance énergétique réelle de l'installation. D'un point de vue comptable pour le client, cela revient à transférer une partie de l'enveloppe consacrée à l'investissement vers son budget de fonctionnement (ou d'exploitation). Si cette variation des mensualités et le transfert des budgets ne semblent pas insurmontables pour une entreprise du secteur privé, ceci pose davantage de difficultés pratiques et légales aux maîtres d'ouvrage publics, car l'exercice de la maîtrise d'ouvrage est très encadré et suit un certain nombre de principes.

Dans ce chapitre, nous allons donc décrire les règles et principes qui encadrent l'exercice de la maîtrise d'ouvrage et notamment les procédures de passation de la commande publique afin d'analyser leur compatibilité avec la mise en œuvre de contrats de performance énergétique.

4.1 La commande publique

4.1.1 L'inélicabilité de la maîtrise d'ouvrage publique

Les travaux réalisés par les personnes de droit public sont fortement encadrés par une série de principes et de textes de lois. L'un des premiers principes concerne l'inélicabilité et l'insaisissabilité du domaine public. La [Loi MOP, 1985] affirme ainsi qu'une personne publique, pour laquelle un ouvrage est construit, a l'obligation d'en assurer la maîtrise d'ouvrage. Le maître d'ouvrage public remplit dans ce rôle « une fonction d'intérêt général dont il ne peut se démettre » (article 2 de [Loi MOP, 1985]). Ce même texte indique que la mission de maîtrise d'ouvrage est de s'assurer de « la faisabilité et de l'opportunité de l'opération envisagée (...), d'en définir le programme, d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement et de choisir le processus selon lequel l'ouvrage sera réalisé (...) ».

Cette mission apparaît donc relativement complexe en raison des compétences techniques qu'elle requiert, et l'on conçoit aisément que certaines collectivités locales ne disposent pas de l'ensemble des compétences nécessaires. La [Loi MOP, 1985] prévoit donc que ces collectivités locales puissent recourir au mandat afin d'externaliser une partie de l'exercice de la maîtrise d'ouvrage (assistance à maîtrise d'ouvrage). Cependant, la responsabilité qui incombe au maître d'ouvrage publique ne peut être transférée.

Dans le cadre de cette loi, les maîtres d'ouvrage public, et en particulier les collectivités locales, disposent de plusieurs modalités d'action pour la réalisation de leurs missions de service public : soit elles sont en mesure d'assurer ces missions par leur propres moyens techniques et financiers et ont la possibilité de mettre en place une régie communale (ou intercommunale pour les syndicats de communes), soit elles peuvent recourir au secteur privé en utilisant les outils de commande publique prévus par la loi.

Le droit français reconnaît ainsi trois type de contrats publics permettant la passation de commandes publiques :

- les marchés publics ;
- les délégations de services publics ;
- les contrats de partenariat.

Ces trois outils juridiques permettent d'associer les acteurs privés à la réalisation et/ou à l'exploitation des équipements ou des services publics tout en respectant l'inélicabilité de la maîtrise d'ouvrage publique. Notons que le droit communautaire, dont le but est d'harmoniser les législations des Etats Membres dans ce domaine, ne reconnaît que deux catégories de contrats publics ([Directive 2004/18]) :

- les marchés publics ;
- les concessions.

Les délégations de services publics répondent à la définition des concessions dans le droit communautaire, tandis que les marchés publics et les contrats de partenariat entrent dans le cadre juridique communautaire des marchés publics (cf. tableau 4.1).

Droit français	Marchés Publics Code des marchés publics [CMP, 2006]	Contrats de partenariat - Ordonnance du 17 juin 2004 ([Ord. 2004-559]) - Loi du 28 juillet 2008 ([Loi n°2008-735])	Délégation de service public - Loi du 3 janvier 1991 - Loi « Sapin » du 29 janvier 1993 - Loi « MURCEF » du 11 décembre 2001
Droit Communautaire	Marchés Publics Directives du 31 mars 2004 portant sur la coordination des procédures de passation des marchés publics de fourniture, de travaux et de services ([Directive 2004/17] et [Directive 2004/18])		Concession - Communication interprétative de la Commission sur les concessions en droit communautaire - Directives du 31 mars 2004 ([Directive 2004/17] et [Directive 2004/18]) - Communication interprétative de la Commission concernant les PPP et le droit communautaire des concessions du 15 novembre 2005

TAB. 4.1 – Classification comparée des contrats de commande publique en droit français et communautaire (d’après [IGD, 2006]).

4.1.2 Les marchés publics

Les grands principes

Un marché public est un contrat liant une personne publique, appelée « pouvoir adjudicateur », et un acteur privé (ou public) qui doit répondre aux besoins de la personne publique en matière de travaux, de services ou de fournitures. Les règles qui régissent le fonctionnement des marchés publics ainsi que les modalités d’attribution ont d’abord été élaborées par la jurisprudence avant d’être formalisées dans le Code des Marchés Publics [CMP, 2006]. Ces dernières années, le législateur a régulièrement modifié ce code (2001, 2004 et 2006) afin de l’adapter aux besoins en matière de commande publique d’une part, et à l’évolution du droit communautaire européen d’autre part. Toutefois, l’introduction de nouvelles dispositions ou la modification des textes existants n’a pas modifié l’esprit du Code des Marchés Publics et les grands principes de fonctionnement et des procédures d’attribution de ces marchés sont réaffirmés.

Dans le cadre d’un marché public, le principe de l’inéaliabilité de la maîtrise d’ouvrage publique exprimé dans la loi MOP ([Loi MOP, 1985]) est parfaitement respecté. De plus, cette même loi précise que *la mission de maître d’œuvre est distincte de celle de l’entrepreneur, et qu’une seule personne morale ne peut cumuler ces deux fonctions* (article 7 de [Loi MOP, 1985]). Si pour des raisons techniques cette dissociation peut porter préjudice à la réalisation d’un ouvrage, le pouvoir adjudicateur a la possibilité de confier à groupement de personnes morales une mission portant à la fois sur l’établissement des études et l’exécution des travaux, mais son recours doit être motivé par la mise en évidence de difficultés de conception imposant l’association de l’entrepreneur aux études de l’ouvrage.

L'article 10 de [CMP, 2006] impose une deuxième contrainte d'importance en précisant que « *pour un marché ayant à la fois pour objet la construction et l'exploitation ou la maintenance d'un ouvrage, la construction fait obligatoirement l'objet d'un lot séparé* ». Cet allotissement a été introduit afin de permettre une ouverture à la concurrence plus importante, notamment en faveur des petites et moyennes entreprises (PME). Le pouvoir adjudicateur choisit librement le nombre de lots en fonction des contraintes techniques et des secteurs économiques dont dépendent les prestations. Les candidatures et les offres seront étudiées lot par lot.

Toutefois, il est possible d'attribuer plusieurs lots à un même candidat, dans le cas où l'allotissement est de nature à rendre coûteuse ou techniquement plus compliquée la réalisation des prestations du marché. Si le pouvoir adjudicateur estime que l'allotissement présente un inconvénient technique, économique ou financier, il peut avoir recours à la dévolution sous forme de marché global. Cette dévolution sous forme de marché global n'interdit pas au pouvoir adjudicateur d'identifier les différentes prestations de manière distincte. D'ailleurs, un marché global regroupant des prestations liées à la construction et à l'exploitation doit obligatoirement faire apparaître de manière séparée les prix respectifs de ces prestations. De plus, *il est interdit que la rémunération des prestations d'exploitation ou de maintenance puisse contribuer au paiement de la construction*. Ce type de mécanisme peut être identifié comme le paiement différé d'une prestation, ce qui est strictement interdit par le contenu de l'article 96 du [CMP, 2006].

Ainsi, les marchés publics sont soumis à trois règles principales :

- séparation des missions dévolues à la maîtrise d'œuvre et à l'entrepreneur ;
- allotissement des prestations ;
- interdiction du paiement différé.

Ces règles sont destinées à favoriser la mise en concurrence des répondants et à rendre transparent le processus d'attribution des marchés publics.

Prix des marchés publics

Le prix d'un marché public est un élément à part entière du marché : il est déterminé en fonction des prestations prévues dans le cadre du marché. Ce prix est déterminé lors de l'attribution du marché – on parle de « prix initial » – et il ne peut pas être modifié au cours du marché : c'est à partir de ce prix initial que sera déterminé le « prix de règlement », effectivement payé à l'entreprise titulaire du marché.

En principe, les marchés sont conclus à « prix ferme et définitif » : qu'il s'agisse d'un marché à « prix unitaire » ou qu'il s'agisse d'un marché à « prix forfaitaire », ces prix ne peuvent être modifiés au cours du marché.

Toutefois, le législateur a prévu quelques dispositions permettant d'aménager ce principe en introduisant deux catégories de prix :

- **les prix actualisables** : l'actualisation des prix peut être introduite dans le cas où il s'écoule un délai important entre l'attribution du marché et le début de la

réalisation des prestations. Ce prix actualisable reste un prix ferme qui ne peut être modifié une fois le marché attribué.

- **les prix révisables** : ce type de prix peut être introduit pour tenir compte des variations économiques mais les modalités de calcul de révision ainsi que la période de la mise en œuvre de la révision sont fixées lors de l’attribution du marché. Les modalités de calcul sont déterminées à partir d’une référence ou d’une formule de calcul rendant compte de l’évolution du prix des prestations.

La révision des prix s’appuie sur des indices publiés sous le contrôle de l’administration. On pourra citer, par exemple, les indices élémentaires du coût de la main d’œuvre ou l’indice national pour les réseaux d’électrification publiés au Bulletin Officiel de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes, ou encore la diffusion des Degrés-Jours Unifiés par Météo France. De plus, la révision des prix ne peut pas reposer sur des paramètres dont l’évolution dépend de la volonté du titulaire du marché. Ainsi les formules de révision des prix ne peuvent pas tenir compte de l’évolution de paramètres internes à l’entreprise du marché comme la productivité par exemple.

4.1.3 Les principes de l’appel d’offres

La règle générale pour l’attribution d’un marché public est la procédure d’appel d’offres dont l’objectif de permettre l’égalité d’accès à la commande publique pour les entrepreneurs, fournisseurs et prestataires. Schématiquement la procédure d’appel d’offres classique se décompose en 5 phases représentée sur la figure 4.1.

Le pouvoir adjudicateur commence par définir ses besoins en matière de travaux, fournitures ou services : l’expression de ces besoins doit s’appuyer sur des spécifications techniques précises soit en terme de normes ou de référentiel technique, soit en terme de performance à atteindre ou d’exigences fonctionnelles. Cette première étape se conclut par la rédaction d’un programme fonctionnel.

A partir de ce programme fonctionnel, l’acheteur public va procéder à l’élaboration du cahier des charges qui va spécifier les moyens techniques, juridiques et financiers qui vont permettre de répondre au programme fonctionnel. Du point de vue juridique, ce cahier des charges se traduit par deux pièces juridiques constitutive du dossier de consultation des entreprises¹ (DCE) qui sera remis aux candidats afin qu’ils formulent une offre :

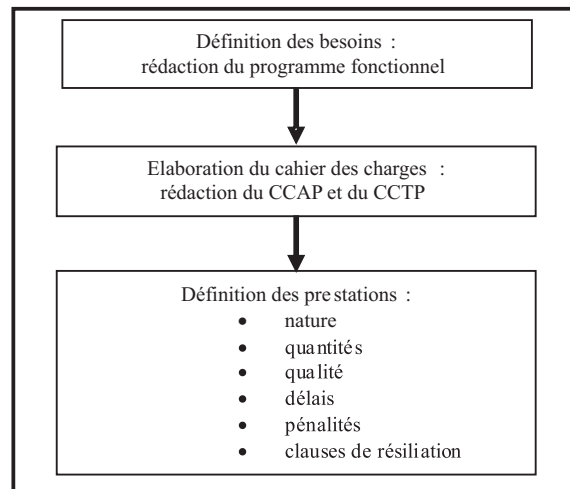
- **le cahier des clauses administratives particulières (CCAP)**, qui fixe les dispositions administratives particulières à chaque marché ;

¹Un DCE comprend généralement les pièces suivantes :

- le règlement de consultation (RdC), qui fixe les règles particulières de la consultation ;
- l’acte d’engagement (AE), qui est la pièce signée par le candidat qui présente son offre dans le respect des cahiers des charges qui déterminent les conditions dans lequel le marché est exécuté ;
- le cahier des clauses administratives particulières (CCAP), qui fixe les dispositions administratives particulières à chaque marché ;
- le cahier des clauses techniques particulières (CCTP), qui fixe les dispositions techniques pour l’exécution des prestations particulières à chaque marché ;
- les pièces relatives aux prix et aux quantités : décomposition du prix global et forfaitaire (DPGF) et bordereau de prix unitaires (BDU) et détail quantitatif estimatif (DQE)

-
- le **cahier des clauses techniques particulières (CCTP)**, qui fixe les dispositions techniques pour l'exécution des prestations particulières à chaque marché.

Travaux préliminaires au lancement de la procédure



Procédure d'appel d'offres

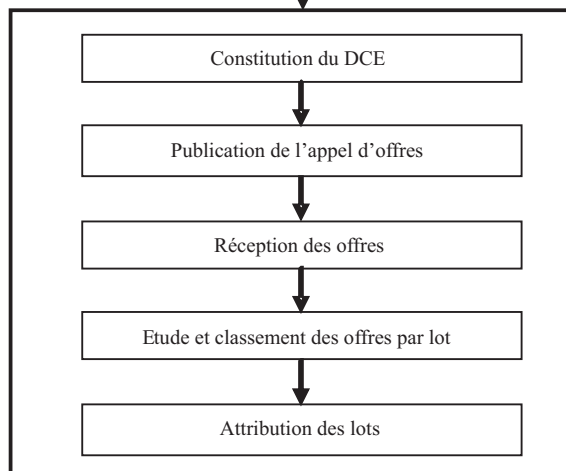


FIG. 4.1 – Schéma du déroulement de la procédure d'appel d'offre « classique ».

Enfin, ces clauses administratives et techniques sont déclinées sous la forme de prestations qui fixe les conditions d'exécution du marché. En termes juridiques, une prestation constitue l'objet matériel ou intellectuel de la vente entre un acheteur et un vendeur (ou prestataire) et qui donne lieu à rémunération. Le DCE précise donc la nature des prestations à fournir, ainsi leurs caractéristiques : quantités, qualité, les délais d'exécution et les garanties de bonne exécution (pénalités, résiliation).

On procède ensuite à l'appel d'offres à proprement parler en publiant les éléments de la commande publique. Les entreprises sont alors invitées à formuler des offres à partir de la consultation du DCE. Ce DCE précise également les critères sur lesquels seront jugées les offres pour l'attribution du marché. Le pouvoir adjudicateur procède ensuite à l'évaluation des offres avant de désigner le titulaire du marché.

Les différents types de marchés

En réalité, ce schéma de principe se décline en plusieurs variantes selon le type de marché et son montant. Ainsi on distingue 3 types de marchés :

- **les marchés de travaux** : ils sont conclus entre le pouvoir adjudicateur et un entrepreneur et ont pour objet « soit l'exécution, soit conjointement la conception et l'exécution d'un ouvrage ou de travaux de bâtiment ou de génie civil répondant à des besoins précisés par le pouvoir adjudicateur qui en exerce la maîtrise d'ouvrage ».
- **les marchés de fournitures** : ils sont conclus avec des fournisseurs et ont pour objet « l'achat, la prise en crédit-bail, la location ou la location-vente de produits ou matériels ». La notion de marché public de fournitures se limite aux marchés portant sur des biens mobiliers.
- **les marchés de services** : ils sont conclus avec des prestataires de services et ont pour objet la réalisation de prestations de services.

Il est intéressant de noter que les services bancaires et d'investissement sont considérés comme des prestations de services au même titre que les services d'entretien et de réparation, à condition toutefois que les marchés correspondants n'aient pas pour objet l'acquisition ou la location de terrains, de bâtiments existants. Toutefois, les contrats de services financiers comme le crédit-bail, liés à une acquisition ou à une location entrent dans le champ d'application du code des marchés publics.

Les prestations présentes dans un marché public sont rarement d'une seule nature, mais comme les contraintes imposées pour la passation des appels d'offre varient en fonction de la nature du marché, les marchés publics sont dans les faits plutôt homogènes. En effet, comme on peut le voir dans le tableau 4.2, les procédures deviennent très vite plus contraignantes pour les services et fournitures.

Montant du marché (montant hors taxes)	Marché public de travaux	Marché public de services	Marchés public de fournitures
Inférieur à 4 000 €	Procédure d'appel d'offres adaptée sans obligation de publicité		
Entre 4 000 € et 90 000 €	Procédure d'appel d'offres et publicité adaptées librement		
Entre 90 000 € et 210 000 €	Procédure d'appel d'offres choisie librement et publicité dans le BOAMP	Procédure d'appel d'offres choisie librement et publicité dans le BOAMP	
Entre 210 000 € et 5 270 000 €		Appel d'offres et publicité dans le BOAMP et JOUE	
Au-dessus de 5 270 000 €	Appel d'offres et publicité dans le BOAMP et JOUE		

BOAMP : Bulletin Officiel des Annonces des Marchés Publics

JOUE : Journal Officiel de l'Union Européenne

TAB. 4.2 – Seuil des procédures à suivre pour la passation d'appel d'offres pour les collectivités locales ([CMP, 2006])

Ainsi dès que le montant d'un marché public de services ou de fournitures dépasse 210 000 €, une collectivité territoriale n'a, a priori, plus le choix de la procédure à suivre pour l'attribution de l'appel d'offres. Nous verrons dans le paragraphe suivant quelles

sont les différences entre les différentes procédures disponibles pour l'attribution d'un marché public. Notons enfin, que dans le cas où le marché porte à la fois sur des travaux, des services ou des fournitures, c'est l'objet principal (c'est-à-dire les prestations dont le montant est le plus important) qui impose sa catégorie à l'ensemble du marché, et ce quel que soit l'allotissement effectué.

4.1.4 Procédures d'appel d'offres

Le code des marchés publics [CMP, 2006] distingue quatre catégories de procédures :

- les appels d'offres ouverts ou fermés ;
- la procédure négociée ;
- la procédure de dialogue compétitif ;
- les autres procédures spécifiques dont le concours et le marchés de conception-réalisation.

Enfin, le pouvoir adjudicateur peut également, dans certaines conditions, notamment pour les marchés dont le montant reste modeste (cf. tableau 4.2), choisir une procédure d'appel d'offres dite « adaptée » :

L'appel d'offres ouvert ou fermé

C'est la procédure « royale », dont les étapes sont schématiquement décrites sur la figure 4.1, avec laquelle le pouvoir adjudicateur choisit le titulaire du marché, sans négociation et sur la base de critères objectifs préalablement définis et portés à la connaissance des candidats par publication de l'appel d'offres au BOAMP ou au JOUE en fonction du montant du marché. Un appel d'offres est dit fermé – par opposition à ouvert – si une phase de sélection des entreprises autorisées à remettre une offres est introduite dans la procédure. Toutefois, au moins cinq entreprises doivent être autorisées à remettre une offre. Les critères de sélection des entreprises peuvent porter sur les caractéristiques techniques ou financières des entreprises consultées, et peuvent ainsi restreindre la consultation aux petites et moyennes entreprises. Les critères de sélection doivent être mentionnés lors de la publication de l'appel d'offres.

La procédure d'appel d'offres permet de passer une commande publique dans un cadre juridique qui est désormais bien fixé et garantit ainsi la fiabilité juridique de l'attribution du marché en respectant l'ensemble des critères imposés au pouvoir adjudicateur. Toutefois, elle demande que ce dernier soit en mesure de décrire précisément ses besoins et de préciser l'ensemble des éléments du DCE. Les éléments du DCE étant inamovibles une fois l'appel d'offres publié, la consultation court le risque d'être déclarée infructueuse si aucune offre ne parvient à répondre exactement aux besoins du marché.

Enfin, bien que le nouveau Code des Marchés Publics incite le pouvoir adjudicateur à choisir l'offre du « mieux-disant », c'est-à-dire présentant le meilleur rapport qualité/prix, l'offre du « moins-disant » est traditionnellement choisie, après avoir écarté les offres anormalement basses. Ainsi, le candidat présentant l'offre la plus avantageuse économiquement remporte souvent le marché.

La procédure négociée

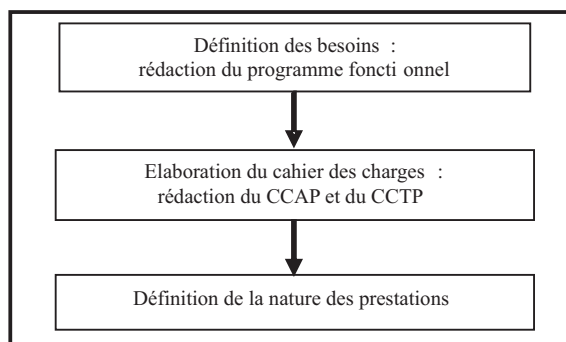
Dans le cadre de cette procédure, le pouvoir adjudicateur peut également choisir de limiter le nombre de candidats à déposer une offre (au minimum, trois candidats). Le délai de remise des offres est raccourci par rapport à la procédure d'appel d'offres classique, ce qui prédestine cette procédure à être utilisée dans les cas d'urgence. Cette procédure se caractérise par une phase de négociation qui s'engage bilatéralement avec chacun des candidats sélectionnés (cf. figure 4.2).

La négociation ne peut porter sur l'objet du marché, ni modifier substantiellement les caractéristiques et les conditions d'exécution du marché, mais porte principalement sur le prix, les quantités, la qualité et les délais d'exécution des prestations afin d'adapter au mieux les offres des entreprises aux demandes du pouvoir adjudicateur. En somme, il s'agit de préciser la géométrie des prestations du marché sans toucher la nature des prestations.

Cette procédure est assez contraignante pour le pouvoir adjudicateur car il doit assurer l'égalité de traitement des candidats - et notamment l'égalité d'accès à l'information - tout au long de la procédure, ainsi que la transparence de la procédure, sans pour autant briser le secret professionnel et commercial des candidats. En principe, la phase de négociation doit permettre de réduire au fur et à mesure le nombre d'offres à étudier, avant de procéder à l'attribution du marché à proprement parler. La phase de négociation alourdit en quelque sorte la procédure d'appel d'offres en apportant des contraintes juridiques supplémentaires et la durée de l'appel d'offres est tributaire des conditions d'exécution de la négociation.

Elle demande donc davantage de moyens au pouvoir adjudicateur une fois que l'appel d'offres a été publié, et augmente le risque que le tribunal administratif déclare la procédure invalide. En revanche, comme la négociation porte sur certains éléments du marché, ces éléments n'ont pas à être formulés aussi précisément dans le DCE que dans la procédure d'appel d'offres classique.

**Travaux préliminaires au
lancement de la procédure**



Procédure d'appel d'offres

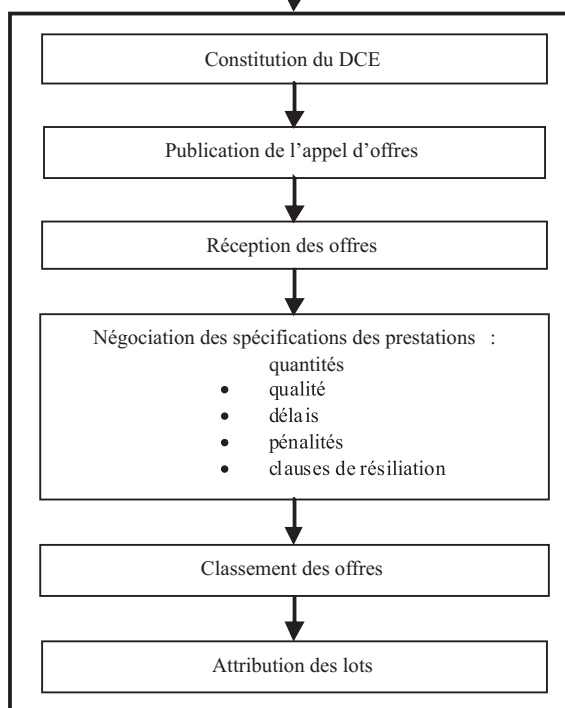


FIG. 4.2 – Schéma du déroulement de la procédure négociée.

Comme nous l'avons vu précédemment, le recours à la procédure négociée est choisi librement par le pouvoir adjudicateur pour des montants inférieurs aux seuils indiqués dans le tableau 4.2. Au-dessus de ces seuils, le recours à la négociation n'est autorisée que dans le cas où une précédente procédure d'appel d'offres s'avère être infructueuse et plus précisément dans le cas où les offres déposées par les candidats sont irrégulières, inacceptables ou inappropriées (article 35 de [CMP, 2006]).

La procédure de dialogue compétitif

Si la procédure négociée revient à définir la géométrie des prestations à mettre en œuvre dans le cadre du marché, la procédure de dialogue compétitif permet au pouvoir adjudicateur de remonter en aval du processus de détermination des éléments du marché. En effet, cette procédure est adaptée aux marchés complexes pour lesquels le pouvoir

adjudicateur n'est pas en mesure de définir seul les moyens techniques à mettre en œuvre pour répondre à ses besoins, ou s'il n'est pas en mesure d'établir le montage financier ou juridique.

Ainsi, lors de la publication de l'appel d'offres, le pouvoir adjudicateur doit fournir un programme fonctionnel décrivant ses besoins mais sans rentrer dans le détail des prestations que comportera le marché. La procédure d'appel d'offres comprend donc une phase de dialogue avec les répondants qui doit permettre de définir le contenu des offres afin qu'elles s'adaptent au mieux aux besoins de l'acheteur public (voir figure 4.3).

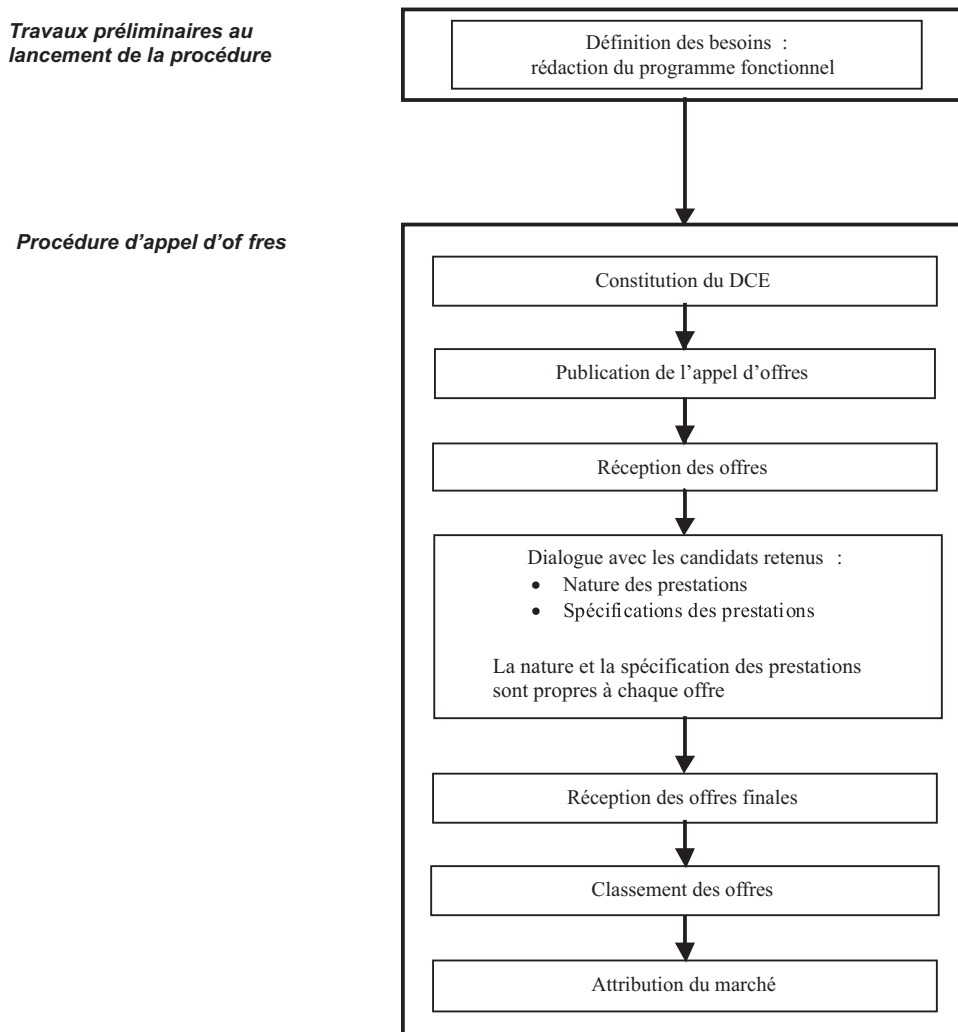


FIG. 4.3 – Schéma du déroulement de la procédure de dialogue compétitif.

La procédure de dialogue compétitif doit permettre au pouvoir adjudicateur d'avoir une meilleure visibilité des solutions techniques, juridiques et financières que les entreprises sont en mesure de lui proposer, puisque les offres ne seront pas contraintes à des spécifications techniques prédéterminées. Le dialogue compétitif offre ainsi davantage de latitude que la négociation afin d'améliorer la qualité et le caractère innovant des offres des candidats en exploitant davantage le savoir-faire des répondants.

De la même manière que la négociation, le pouvoir adjudicateur mène le dialogue en plusieurs phases et peut, à l'issue de chaque phase, écarter un candidat en appliquant les critères de sélection qui auront été préalablement définis dans le DCE. Lorsqu'il estime que la discussion est arrivée à son terme, il demande alors aux candidats de remettre une offre finale. Il faut noter que l'acheteur public n'a pas à rédiger de cahier des charges et que par conséquent l'attribution du marché s'effectuera sur la base du programme fonctionnel remis aux candidats.

Chacune des offres peut comporter des prestations différentes les unes des autres. Le marché est attribué à l'offre la plus avantageuse économiquement. Si toutefois, l'appel d'offres s'avère infructueux, la procédure de dialogue compétitif peut être prolongée par une procédure négociée à condition que l'objet du marché ne soit substantiellement modifiée. Dans le cas contraire, comme pour la procédure d'appel d'offres classique, un nouvel appel d'offres doit être relancé.

La conduite du dialogue doit être conduite de manière équitable avec tous les candidats et, de la même manière que durant la négociation, le secret professionnel et commercial des candidats doit être préservé. Là encore, si le dialogue permet de tirer davantage profit du savoir-faire des entreprises, sa conduite est très encadrée juridiquement, et requiert une certaine maîtrise juridique pour être menée à bien. Ceci augmente donc encore davantage le risque d'invalidité juridique de la procédure.

Enfin, cette procédure requiert également que le pouvoir adjudicateur mobilise des compétences techniques supérieures à un appel d'offres classique car le jury doit être en mesure d'évaluer et de comparer des prestations variables d'une offre à l'autre. Ces compétences sont mobilisées davantage que dans le le cadre d'un appel d'offres classique dont les offres doivent comporter exactement les mêmes prestations, sous peine d'être déclarées inacceptables pour non-conformité à l'appel d'offres.

Le marché de conception-réalisation et le concours

Un marché de conception-réalisation est un marché de travaux passé sous la procédure d'appel d'offres restreint, à la différence que la commission d'appels d'offre est élargie à des maîtres d'œuvre désignés par l'acheteur public et compétents au regard de l'ouvrage à concevoir et est donc constituée en jury. Ce jury formulera un avis motivé sur les offres des candidats, sur la base desquels la commission d'appels d'offre désignera le titulaire du marché. Il va de soi que ces maîtres d'œuvre doivent être indépendants des candidats.

Les prestations que devront exécuter les candidats et qui seront formulées dans leurs offres, comportent obligatoirement un avant-projet sommaire qui présente les performances techniques de l'ouvrage ou des installations techniques à construire.

Le concours est la procédure par laquelle le pouvoir adjudicateur choisit, après mise en concurrence et avis du jury, de la même manière que pour les marchés de conception-réalisation, un plan ou un projet, notamment dans le domaine de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'architecture, de l'ingénierie, avant d'attribuer un marché à l'un des lauréats du concours. La particularité de cette procédure est de permettre

l'indemnisation des répondants pour les moyens qu'ils ont pu mettre en œuvre dans le but de répondre à l'appel d'offres.

La procédure « adaptée »

Pour des marchés dont le montant est inférieur aux seuils indiqués dans le tableau 4.2, le pouvoir adjudicateur peut adapter la procédure d'appel d'offres en fonction de l'objet du marché. Cela permet d'alléger sensiblement la procédure en diminuant le nombre de pièces à fournir aussi bien pour l'acheteur public que pour les répondants. Les modalités de la consultation peuvent librement être adaptées en fonction de l'objet du marché, en s'inspirant des procédures classiques, mais doivent être précisées au moment de la publication de l'appel d'offres.

4.1.5 Synthèse sur les procédures d'appel d'offres pour l'attribution de marché public

Comme nous venons de le voir, l'acheteur public dispose de plusieurs procédures lui permettant de passer une commande sous la forme d'un marché public. Le choix de l'une de ces procédures s'effectue au regard des besoins de la collectivité mais également de ses moyens et de ses compétences.

Le lancement d'un appel d'offres classique demande que la collectivité soit en mesure de définir seule ses besoins et de décrire précisément les prestations qui constituent le marché. Ceci a deux conséquences : la première est que la collectivité doit maîtriser en interne les compétences techniques et juridiques nécessaires à la mise en place de l'appel d'offres puis de son suivi. Si l'objet du marché est une prestation courante, cela ne constitue pas une difficulté, mais dans le cas où l'on souhaite mettre en place des technologies ou des prestations innovantes, cela requiert un travail d'ingénierie, ou du moins une veille technologique, qui demande une mobilisation de moyens que toutes les collectivités territoriales ne peuvent pas se permettre.

La deuxième conséquence est que la définition des prestations par la collectivité va verrouiller la possibilité d'exploiter le savoir-faire des entreprises et des prestataires, qui sont, sans aucun doute, en meilleure position pour présenter des offres innovantes. En revanche, le dialogue compétitif doit permettre d'exploiter le savoir-faire de chaque entreprise, en l'autorisant à présenter ses propres solutions. L'accès à l'innovation est donc potentiellement plus important dans le cadre d'une procédure de dialogue compétitif que dans le cadre d'un appel d'offres classique. Entre ces deux procédures, la négociation ne permet pas d'accéder à des nouvelles solutions, car la collectivité définit en grande partie l'objet du marché, mais elle permet potentiellement de profiter de l'efficacité des entreprises et d'accroître la qualité des prestations, car les spécifications techniques des équipements peuvent entrer dans les termes de la négociation.

Le recours à la négociation, et a fortiori au dialogue compétitif, sont des procédures plus risquées d'un point de vue juridique. L'égalité de traitement des candidats ainsi que la transparence dans le processus d'attribution du marché doivent être garantis tout au long de la procédure. Le risque d'un recours au tribunal administratif par l'un des candidats, dans le but d'invalidier la procédure d'appel d'offres, augmente donc par rapport à

la procédure classique davantage sécurisée juridiquement. De plus, la durée de ces procédures peut très vite augmenter et rallonger encore davantage la procédure d'attribution du marché.

Ainsi la conduite de ces procédures de dialogue compétitif et négociation demande une certaine rigueur. Elles requièrent une forte volonté de la part de l'acheteur public qui doit mener la négociation ou le dialogue de manière à faire émerger les solutions les plus profitables, exploitant au mieux le savoir-faire des entreprises. Le potentiel d'exploitation de l'innovation et du savoir-faire des entreprises des différentes procédures d'appel d'offres est représenté sur la figure 4.4, en fonction du coût de la procédure qui augmente principalement avec le risque d'invalidité juridique et l'allongement de la procédure de sélection.

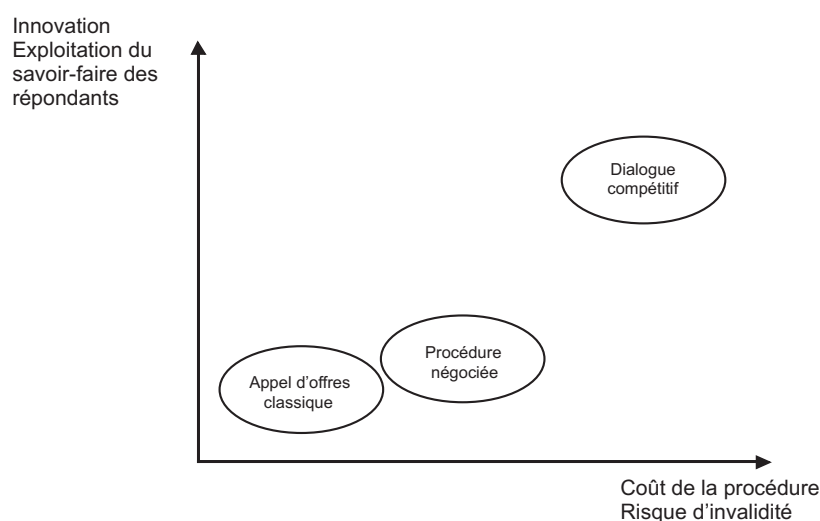


FIG. 4.4 – Potentiel d'accès à l'innovation des différentes procédures d'appel d'offres.

4.2 La délégation de service public

4.2.1 Principes

La délégation de service public est un contrat par lequel une personne publique confie la gestion d'un service public à un délégataire public ou privé. La rémunération de ce contrat est principalement liée aux résultats directs de l'exploitation du service : ce sont les usagers du service qui rémunèrent le délégataire pour l'accès au service. Ce peut être le cas pour la gestion des réseaux d'eau potable, les réseaux de transports publics ou encore les réseaux de distribution d'électricité, de gaz ou de chaleur.

Le délégataire peut être chargé d'entreprendre les travaux ou les acquisitions nécessaires au bon fonctionnement du service. Dans ce cas, la durée du contrat de délégation prend en compte la durée nécessaire à l'amortissement financier des investissements. Ces investissements sont réalisés sur les fonds propres du délégataire qui supporte alors tous les risques liés à l'exploitation de l'installation, c'est-à-dire les risques liés à la construc-

tion et à la performance des installations mais également les risques liés à la variation de demande (ou « risque de trafic »).

Dans tous les cas, une délégation de service publique a une durée déterminée à l'avance lors de l'octroi de la délégation par la personne publique. Pendant cette période, la personne publique reste maître d'ouvrage des installations si bien que tous les travaux non prévus lors de la phase d'attribution de la délégation doivent faire l'objet d'une demande auprès d'une assemblée délibérante constituée d'élus et de responsables techniques de la collectivité locale. De même, les installations dont l'exploitation est déléguée, restent dans le patrimoine de la collectivité et lui reviennent en fin de contrat. Enfin notons que le délégataire n'a pas la liberté de fixer seul les tarifs pour l'accès au service par les usagers : les tarifs font partie intégrante de l'offre présentée lors l'appel d'offres.

4.2.2 Evaluation du contenu en efficacité

Pour le délégataire, le mode de rémunération est indexée sur l'unité de service vendu : l'utilisateur du service ne paie que ce qu'il consomme (par exemple, au trajet pour les transports publics, au kWh pour l'électricité ou au m^3 pour le gaz), si bien que l'exploitant est incité à augmenter l'efficacité du service en amont du point de livraison. Il dispose cependant d'une certaine liberté pour atteindre cet objectif car il lui est possible de présenter son savoir-faire, et de présenter un plan d'investissement lors de la phase d'appel d'offres pour l'octroi du contrat de délégation.

En effet, la personne publique ne transfère pas seulement la mission d'exploitation du service, mais le délégataire prend également en charge la conception, la réalisation et le financement des travaux nécessaires. Si les éléments financiers sont bien évidemment soumis à l'approbation de l'autorité délégante, la maîtrise des phases de conception, réalisation, exploitation et de financement permet les optimisations techniques et économiques favorables à la maîtrise de l'énergie et à la maîtrise du coût global du service. Cela constitue pour la collectivité un bon levier d'amélioration de ses installations, tout en transférant la majeure partie des risques. De plus, la loi autorise la délégation pour une durée suffisamment longue pour assurer l'amortissement des installations.

Cependant, la délégation de service public étant rémunérée par les usagers lors de l'utilisation du service, ce dispositif juridique n'est pas adapté pour les services publics non-marchands dont la rémunération ne peut être indexée sur son utilisation par les usagers. Ainsi le financement de bâtiments publics ou de certains services publics comme l'éclairage public et par conséquent l'amélioration de leur efficacité énergétique par exemple ne peuvent pas être portés par une délégation de service public.

4.3 Les contrats globaux

4.3.1 Le Bail Emphytéotique Administratif (BEA)

Le bail emphytéotique administratif est un contrat de longue durée (entre 18 et 99 ans) permettant au titulaire de bénéficier d'un droit réel sur l'objet du contrat, souvent immobilier, lequel peut devenir propriété du bailleur à l'issue du contrat. Le BEA peut

porter sur une dépendance du domaine public, comme du domaine privé des collectivités territoriales (cf. [CGCT, 2006]), mais ne peut être conclu que pour la réalisation d'une opération d'intérêt général ou d'une mission de service public.

Ce type de contrat permet donc à une collectivité de confier la réalisation d'un ouvrage, répondant à ses besoins en matière de service public ou d'intérêt général, mais sans en diriger la réalisation. S'agissant d'un bail, il peut être cédé à tout moment à une autre personne. La jurisprudence montre que l'administration peut s'opposer à cette cession que si elle démontre objectivement que cette cession remet en cause la continuité du service rendu.

Il s'agit, en général, d'un moyen pour une collectivité de faire financer la construction d'un bien immobilier par un partenaire privé à qui elle verse un loyer correspondant au montant de l'investissement consenti (mécanisme du crédit-bail). La plupart du temps, c'est l'occupant de l'immeuble qui assume les charges d'exploitation. Le titulaire n'assume aucune autre prestation que celles qui sont associées à la conception et la construction de l'ouvrage.

4.3.2 Le contrat de partenariat

Il y a quelques années, les contrats de partenariat existaient en France sous la forme des Marchés d'Entreprises de Travaux Publics (METP). Cet type de contrat tentait de rendre possible la passation d'appel d'offres attribuant des marchés globaux à un même groupement d'entreprises ou une même entreprise. Cependant, ces contrats comprenant financement, construction, exploitation et entretien d'un ouvrage public, mais également exploitation du service public associé, permettait un paiement différé de la personne publique, ce qui est contraire au code des marchés publics. L'endettement qui en découlait n'apparaissait pas dans les comptes de la collectivité, ce qui le rendait difficilement gérable. De plus, les METP introduisaient un sorte d'opacité dans la répartition des trois composantes du marché (construction, financement, exploitation) qui rendait difficile le contrôle effectif des coûts.

Les METP ont été supprimés en 2001, mais la législation française a évolué en réintroduisant les contrats de partenariat par l'ordonnance du 17 juin 2004 ([Ord. 2004-559]). Ces contrats de partenariat sont un nouveau moyen, plus contraignant et plus encadré, d'attribuer des contrats globaux. Le cocontractant doit ainsi assurer au moins trois missions :

- le préfinancement des investissements ;
- la construction des ouvrages et équipements ;
- leur entretien, leur maintenance et leur gestion ou exploitation.

De ce fait, le contrat de partenariat permet de déroger aux principes de [Loi MOP, 1985] : il supprime l'allotissement et autorise le paiement différé. De plus, le cocontractant assure la maîtrise d'ouvrage de l'objet du contrat.

La structure de ce contrat ressemble donc beaucoup à une délégation de service public qui peut également être interprétée comme un forme de partenariat public-privé. La dif-

férence notable entre ces deux formes de contrats est que la délégation de service public est établie en vue de l'exploitation par le titulaire du contrat d'un service public, dont les résultats contribuent essentiellement à sa rémunération.

La rémunération d'un contrat de partenariat est versée par la personne publique. *Contrairement à la délégation de service public, le risque de recettes (ou de volume) n'est pas transféré au cocontractant.* Les versements s'effectuent sur toute la durée du contrat et peuvent être assujettis à des critères de performance.

Le législateur a restreint les possibilités de recours aux contrats de partenariat à deux hypothèses : celle de l'urgence ou celle d'un projet complexe. Le recours à un contrat de partenariat peut ainsi être justifié en cas « d'urgence » ([Loi n°2008-735]), c'est-à-dire dans le cas où le besoin en construction ou en rénovation résulte d'une cause extérieure à la collectivité (exemple-type : la catastrophe naturelle), ou s'il est nécessaire de rattraper un retard préjudiciable dans la réalisation d'équipements collectifs. La notion de complexité (ou de projet complexe) peut être évoquée quand la collectivité n'est pas objectivement en mesure de définir elle-même les moyens techniques pouvant répondre à ses besoins ou d'établir le montage financier du projet. Le caractère d'urgence ou de complexité doit être démontré.

Ceci dit, les contrats de partenariat sont des marchés publics au sens du droit communautaire, et de ce fait, la passation de tels contrats doit suivre des règles similaires aux procédures d'attribution des marchés publics. La démonstration du caractère complexe se réfère à des conditions semblables que celles qui justifient le recours à la procédure du dialogue compétitif du code des marchés publics [CMP, 2006]. Ainsi, si le caractère complexe d'un projet est acquis, la collectivité peut avoir recours au contrat de partenariat et dans le même temps procéder par dialogue compétitif pour la passation du contrat. Ainsi, les contrats de partenariat sont d'abord un moyen de mobiliser la capacité d'investissement des entreprises privées mais permettent également, contrairement aux marchés publics de supprimer facilement la séparation des lots « construction » et « exploitation » en faveur de la mise en place de solutions globales.

4.3.3 Analyse du contenu en efficacité énergétique

Un bail emphytéotique administratif ne concerne que les prestations de conception et de construction d'un bâtiment, la plupart du temps. Nous avons vu au chapitre 2 que ces prestations avaient un contenu en efficacité énergétique plutôt faible en l'absence de la prise en charge de la conduite et de la maintenance des installations. Ce type de contrat ne transfère qu'un risque modéré au prestataire, et laisse porter l'ensemble des risques de dérive des performances énergétiques à l'occupant de du bâtiment. Les baux emphytéotiques ne sont donc pas l'outil adapté à la mise en place d'un contrat de performance énergétique.

Les contrats de partenariat se présentent en revanche comme une solution plus adaptée. Dans ce type de contrat, le prestataire supporte la majeure partie des risques liés à la conception, la construction, et l'exploitation des installations ou des bâtiments. Ces contrats ont été conçus pour aller de pair avec une rémunération sur performance. De plus, l'architecture des contrats de partenariat permet de contourner les contraintes des

marchés publics ce qui suggère que le mécanisme des contrats de performance énergétique peut s’y insérer.

Cependant, la mise en place d’un contrat de partenariat en soi n’implique pas la mise en place d’un contrat de performance. Le recours à un contrat de partenariat est subordonné au caractère urgent ou complexe du projet. Or le caractère urgent implique une passation d’un marché par une procédure d’appels d’offres restreint, laquelle n’est pas adaptée à l’émergence de solutions innovantes. De plus, le transfert de l’ensemble des risques vers le prestataire peut se traduire par un désengagement total du pouvoir adjudicateur, et notamment des services techniques dont le savoir-faire en matière d’efficacité énergétique ne peut que se perdre.

4.4 Intégration des contrats de performance énergétique dans la commande publique

L’objectif de ce chapitre était d’analyser la faisabilité de réaliser un contrat de performance énergétique dans le cadre d’une commande publique. Nous synthétisons les caractéristiques des différents modes de commande publique dans le tableau 4.3.

	Marchés Publics	Bail emphytéotique administratif	Contrats de partenariat	Délégation de service public
Nature de l’objet du contrat	monofonctionnel	monofonctionnel immobilier	objet monofonctionnel	objet multifonctionnel
Nature des prestations	toute	conception / construction exploitation si convention supplémentaire	conception / construction maintenance et gestion	conception / construction maintenance et gestion exploitation du service
Durée typique	courte durée marchés successifs	longue durée	longue durée	longue durée
Financement	public	préfinancement par le privé	préfinancement par le privé	financement par le privé délégation
Paieement	public	public	public	paiement par l’usager ou mixte
Bénéficiaire du service rendu	l’administration	l’administration	l’administration	l’usager du service public
Risques portés par le privé	construction	construction	construction performance	construction performance volume

TAB. 4.3 – Tableau comparatif des différents modes de la commande publique ([Ménéménis, 2008])

Nous rappelons que le principe du contrat de performance est de financer l’investissement d’une amélioration par la diminution des dépenses d’exploitation. Ce type de

services énergétiques ne peut donc être pris en charge que par un prestataire qui assume les phases de conception, de construction et d'exploitation. Tout type de commande publique ne comprenant pas ces trois phases est donc à exclure : le bail emphytéotique administratif n'est donc pas un mode de commande publique compatible avec un contrat de performance énergétique.

Il convient ensuite de faire la distinction entre les objets de la commande publique selon leurs bénéficiaires. Les objets rendant un service public, comme un réseau de chaleur urbain par exemple, sont susceptibles d'être délégués à un prestataire par l'intermédiaire d'une délégation de service public. Or dans le cadre d'une délégation de service public, le titulaire prend à sa charge tous les risques liés à la construction, à la gestion et au volume lors de son exploitation, comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe 4.2. Un contrat de performance énergétique peut tout à fait être mis en œuvre dans le cadre d'une délégation de service public, mais il ne concerne que le titulaire du contrat qui supporte tous les risques.

Dans les cas où le contrat ne peut faire l'objet d'une rémunération par l'utilisateur, seuls les marchés publics ou les contrats de partenariat peuvent être envisagés. Comme nous l'avons vu, les marchés publics sont soumis à de fortes contraintes, qui semblent a priori rédhibitoires pour la mise en œuvre d'un contrat de partenariat :

- l'allotissement s'oppose à la prise en charge par un même prestataire de toutes les prestations comprises dans un contrat de performance énergétique ;
- l'interdiction du paiement différé supprime la possibilité de préfinancer l'amélioration en transférant du budget de fonctionnement vers du budget d'investissement ;
- l'attribution de marchés à de prix ferme empêche l'indexation des prix sur les performances réelles, bien qu'il soit possible de les moduler en introduisant des pénalités sur des garanties de performance (cf. chapitre 3)

Dans ces conditions, les contrats de partenariat semblent tout indiqués pour pallier les défauts des marchés publics et permettre l'intégration des contrats de performance énergétique dans la commande publique (cf. [Gimélec, 2007]). Il faut toutefois signaler que si l'allotissement est devenu le principe de base dans la passation de marchés publics, il reste possible de supprimer l'allotissement dans le cadre des marchés publics et de formuler des appels d'offre sous la forme d'un marché global à la condition que l'allotissement présente un inconvénient technique, économique ou financier. On aura sans doute recours à cette possibilité dans le cas de marchés attribués sous la procédure de dialogue compétitif (et réciproquement), c'est-à-dire dans les cas où le répondant est à l'origine de la solution technique, et est donc le seul à être en mesure d'assurer la bonne exploitation de la solution mise en place.

Néanmoins, bien qu'un contrat de partenariat soit un contrat global, les modalités de rémunération doivent être transparentes dans la rédaction du contrat et doivent faire apparaître les éléments liés à la conception, à la construction, à l'exploitation ainsi que ceux qui sont liés au financement. Des indicateurs de performance portant sur chacun de ces postes doivent conditionner la rémunération du contrat. Le premier critère de performance réside dans le fait que la rémunération du contrat ne débute qu'à la mise en service de l'ouvrage.

Dans les deux cas (marché public attribué avec la procédure de dialogue compétitif et contrat de partenariat), l'intégration et la réussite d'un contrat de performance énergétique est d'abord conditionné à la capacité de la collectivité à mener une procédure de dialogue compétitif et à assurer ensuite le suivi et le pilotage des marchés publics, le cas échéant. Cette capacité repose sur deux facteurs : la compétence des services techniques de la collectivité pour suivre la procédure et évaluer les réponses, et sur la volonté politique de soutenir une procédure longue et risquée. Nous noterons enfin, qu'un bon niveau de compétences techniques chez les ingénieurs des collectivités territoriales suppose que l'attribution de marchés de travaux et ou de contrats de partenariat s'accompagne d'un suivi sérieux des contrats de manière à conserver l'objet de ces contrats dans le champ de compétences des ingénieurs territoriaux.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une typologie des contrats de services énergétiques qui permet de les caractériser selon trois dimensions :

- le contenu, qui caractérise le type de prestations techniques prises en charge dans le contrat ;
- la portée du contrat, qui détermine la quantité d’installations techniques sur laquelle porte le contrat ;
- les modalités de rémunération, qui précisent les mécanismes de paiement des services au prestataire.

Sur la base de cette typologie, nous avons développé une méthodologie pour analyser l’efficacité énergétique intrinsèque des contrats classiques de services énergétiques. Nous avons ainsi pu mettre clairement en évidence les mécanismes à l’origine de l’efficacité énergétique et conclure sur la pertinence des contrats traditionnels de services énergétiques. Ainsi, il est apparu que les contrats les plus efficaces énergétiquement parlant, contiennent la prestation « achat d’énergie » et sont des contrats à garantie de résultat. De plus, pour être efficaces, les contrats qui portent sur les installations de production d’énergie finale doivent être rémunérés par prix unitaire sur la quantité finale, tandis que ceux qui portent sur l’ensemble des installations doivent être rémunérés au forfait.

Enfin, nous avons présenté et analysé les formes récentes de contrats de services énergétiques construites sur le principe du contrat de performance énergétique. Nous avons montré que l’efficacité énergétique de ces contrats repose sur une prise de risques accrue de la part du prestataire, dont la rémunération n’est plus basée sur la quantité d’énergie finale fournie mais sur la quantité d’économies d’énergies générées. Ainsi, le mécanisme sur lequel repose le contrat de performance énergétique, permet de favoriser l’investissement dans des projets d’amélioration de l’efficacité énergétique, dont le retour sur investissement est garanti par le prestataire grâce aux économies d’énergie générées par l’amélioration.

Les études de cas, que nous avons analysées, ont permis de montrer les nuances entre un contrat de fourniture d’énergie avec engagement de maîtrise de la facture énergétique et un contrat de performance énergétique. Nous avons pu également mettre en évidence le besoin d’outils techniques indispensables à l’indexation de la performance énergétique. Ces outils, mis en œuvre dans le cadre d’un protocole d’évaluation, doivent permettre de comparer en toute transparence les consommations d’énergie des installations dans des conditions de fonctionnement semblables, avant et après la réalisation des améliorations de la performance énergétique.

Enfin, l'analyse du code des marchés publics et, de manière plus générale, des procédures de commande publique a mis en évidence les obstacles à la mise en oeuvre des contrats de performance énergétique dans le secteur public. L'adaptation des règles de passation de commande publique ou le développement d'un cadre juridique spécifique à ce type de contrat et la formation de la maîtrise d'ouvrage à la passation et la gestion de ces nouveaux types de contrats nous semblent donc être les deux principaux axes d'études et de développement à suivre pour la diffusion massive de vrais contrats de performance énergétique dans le secteur public.

Deuxième partie

Développement d'un protocole d'évaluation des performances énergétiques des installations de production frigorifique

Introduction

La fin du chapitre 3 met en évidence que le calcul des économies d'énergie générées par un projet d'amélioration des performances énergétiques d'une installation consiste à évaluer les éléments du membre de droite dans l'équation suivante grâce à la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation des économies d'énergie :

$$\text{économies} = \text{conso}_{\text{réf}} - \text{conso}_{\text{suivi}} + \text{ajustement}$$

avec :

- *économies* [kWh] : les économies d'énergie réalisées sur une période dite « de suivi » après la réalisation du projet ;
- *conso_{réf}* [kWh] : la consommation d'énergie du site mesurée pendant une période dite « de référence » avant la réalisation du projet ;
- *conso_{suivi}* [kWh] : la consommation d'énergie du site mesurée pendant une période dite « de suivi » sur laquelle est réalisée l'évaluation des améliorations ;
- *ajustement* [kWh] : les ajustements de consommation.

De nombreux ouvrages et articles traitent des principes de l'élaboration et la mise en œuvre de ces protocoles, en particulier le *Protocole International de Mesure et de Vérification du Rendement* [IPMVP, 2007] et le guide ASHRAE n°14 « *Measurement of Energy and Demand Savings* » [ASHRAE, 2002]. Un troisième ouvrage issu du programme de maîtrise de l'énergie (*Federal Energy Management Program (FEMP)* du ministère de l'énergie des États Unis (*U.S. Department of Energy (DOE)*)) reprend ces principes et les décline en recommandations pour leur mise en pratique sur les principaux équipements techniques d'un bâtiment.

Dans cette partie, nous allons d'abord synthétiser le contenu de ces ouvrages pour présenter quelques grands principes de l'évaluation des économies d'énergie réalisées par un projet d'amélioration des performances énergétiques, et en particulier, dans le cadre d'un contrat de performance énergétique (chapitre 5). Nous déclinons ensuite ces principes de manière à établir des protocoles d'évaluation des performances énergétiques des installations de production frigorifique (chapitre 6).

Chapitre 5

Protocoles d'évaluation des économies d'énergie

5.1 Principes

5.1.1 Périmètre d'évaluation

Comme nous venons de le rappeler en introduction de cette partie, l'évaluation des économies d'énergie générées par un projet requiert en premier lieu l'évaluation de la consommation d'énergie des équipements, du site ou plus généralement de l'objet technique sur lesquels porte l'amélioration. Il convient donc dans un premier temps de préciser le système évalué, en établissant clairement un **périmètre d'évaluation**.

Lors de la définition du périmètre d'évaluation, deux approches différentes, schématisées sur la figure 5.1, sont possibles :

- l'approche « **site entier** » : le périmètre s'étend à l'ensemble du site sur lequel est réalisé le projet d'amélioration. Il s'agira dans la plupart des cas d'un bâtiment, d'un site industriel ou d'une partie totalement indépendante de ce site, c'est-à-dire sans aucune interaction avec le reste du site.
- l'approche « **isolement** » : le périmètre est circonscrit autour du projet d'amélioration, et peut se restreindre à l'objet technique qui subit la modification. On définit alors autant de périmètres d'évaluation que de projets d'amélioration.

Dans le cadre de la première approche, la performance du système compris dans le périmètre d'évaluation, donc du site ou du bâtiment évalué, pourra s'écrire comme le rapport entre les besoins en énergie utile nécessaires pour répondre à la demande d'usages finals et les quantités d'énergie finales consommées pour fournir ces besoins.

La seconde approche isole un équipement technique ou une partie d'une installation, parmi les autres équipements ou installations de transformation et de distribution de l'énergie. La performance énergétique pourra donc s'écrire selon le cas, soit comme le rapport entre l'énergie utile produite et l'énergie consommée (par exemple, dans le cas d'une chaudière ou d'un groupe de production d'eau glacée), soit comme le rapport entre le flux d'énergie ou de matière traversant le périmètre et la quantité d'énergie consommée (par exemple, dans le cas d'une pompe ou d'un ventilateur).

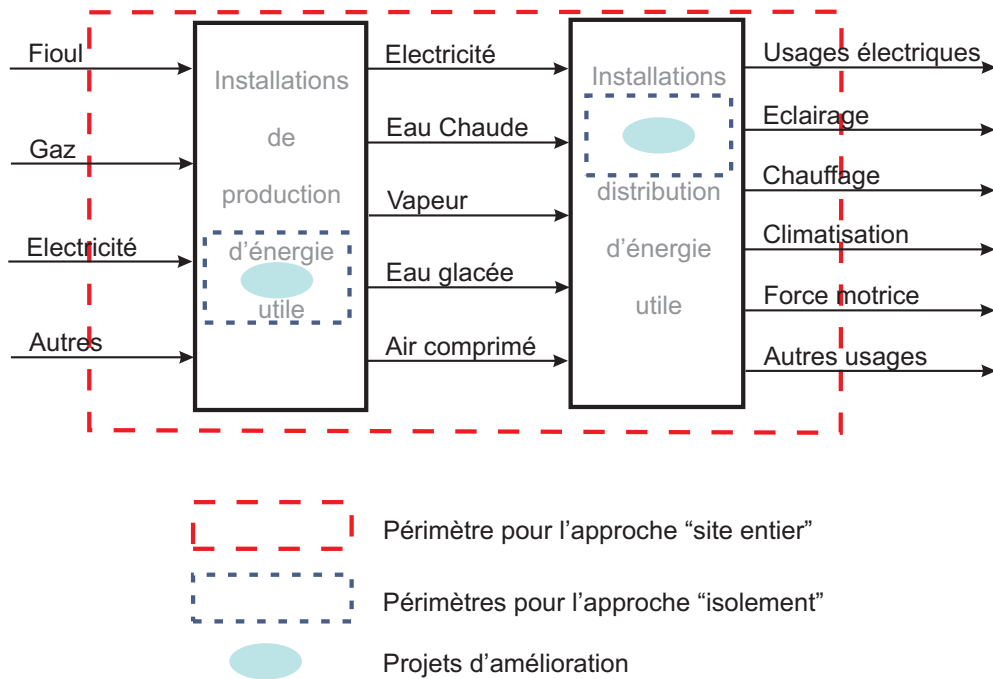


FIG. 5.1 – Périmètres pour l'évaluation des performances énergétiques des systèmes.

Une fois le périmètre d'évaluation défini, il convient de décrire les conditions de fonctionnement imposées aux frontières du système évalué, parmi lesquelles on peut distinguer :

- la **demande énergétique** à laquelle doit répondre le système ;
- l'**environnement** dont certaines caractéristiques influent sur le comportement énergétique du système et sur la demande énergétique ;
- la **consommation d'énergie** que l'on cherche à évaluer.

La description de ces conditions de fonctionnement se traduit par la définition de l'évolution des grandeurs physiques qui les représentent. On définit un point de fonctionnement comme la donnée de l'ensemble des grandeurs physiques décrivant les conditions de fonctionnement du système à un instant donné. Ainsi, l'observation de ces points de fonctionnement peut se traduire, par exemple, par la description de leur évolution dans le temps sur une période d'observation, ou bien par leur distribution sur cette période.

De plus, le fonctionnement du système évalué peut également influencer sur certaines caractéristiques de son environnement proche. En effet, tout système de transformation de l'énergie ou de transport de matière rejette une quantité d'énergie, souvent qualifiée d'« énergie perdue », dans son environnement qui s'en retrouve de fait modifié. Nous pouvons prendre l'exemple de l'éclairage qui fournit à la fois une énergie lumineuse utile mais qui constitue un apport thermique non négligeable dans les locaux. Ce dégagement thermique réduit les besoins énergétiques de chauffage et augmente les besoins énergétiques de climatisation des locaux.

Toute modification apportée à un système est susceptible de modifier ces effets sur l'environnement du système, et par suite les conditions de fonctionnement d'autres équi-

pements techniques voisins. Par conséquent, lors de la mise en place d'un protocole d'évaluation par isolement des projets d'amélioration, il convient de repérer ces effets énergétiques et d'évaluer l'impact que les améliorations apportées par le projet pourraient avoir sur la consommation d'énergie d'équipements situés en dehors du périmètre d'évaluation. On parle alors d'« **effets interactifs** ». En reprenant l'exemple précédent, le périmètre d'évaluation d'un projet d'amélioration de l'éclairage d'un local pourrait se limiter aux seules installations d'éclairage et se réduire aux mesures de la puissance électrique installée et de la durée de fonctionnement. Or, à cause du rejet de chaleur de l'éclairage, une modification de la puissance électrique d'éclairage entraîne une baisse des apports thermiques et donc une modification des besoins énergétiques du local, et plus précisément, une diminution des besoins de refroidissement et une augmentation des besoins de chauffage. On veillera donc à évaluer les conséquences de cette modification des apports thermiques sur la consommation énergétique des autres équipements techniques pour le chauffage et la climatisation.

Ainsi, l'évaluation des performances énergétiques d'un système consiste à évaluer, sur le périmètre d'évaluation choisi, les conditions de fonctionnement et les effets énergétiques du système sur son environnement comme nous l'avons représenté sur la figure 5.2.

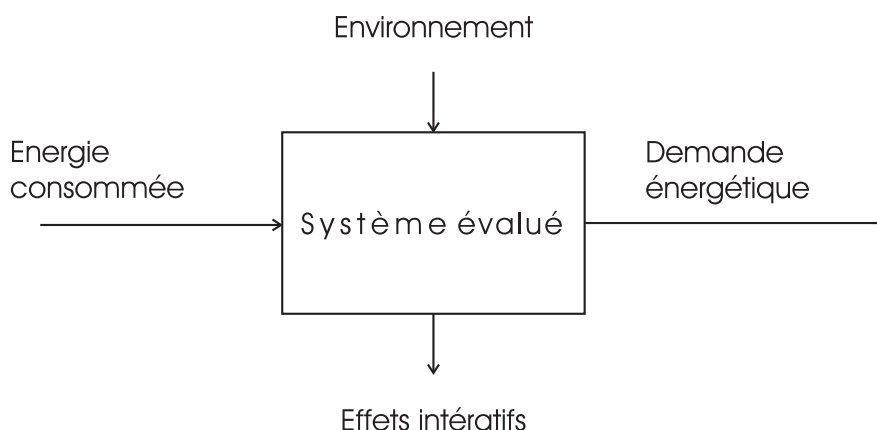


FIG. 5.2 – Description des conditions de fonctionnement d'un système évalué.

A l'évaluation de ces grandeurs physiques succède la recherche de relations explicatives de la consommation d'énergie, en particulier afin de traduire mathématiquement la relation entre la consommation d'énergie et des variables indépendantes caractérisant les conditions de fonctionnement les plus pertinentes.

5.1.2 Période d'évaluation

Parallèlement au choix du périmètre d'évaluation, un grand soin doit être apporté au choix des périodes d'évaluation. On distingue deux périodes :

- la **période de référence** : il s'agit d'une période avant la réalisation du projet d'amélioration sur laquelle est évaluée la consommation dite « de référence » du système évalué ;

-
- la **période de suivi** : il s'agit d'une période après la réalisation du projet d'amélioration sur laquelle est évaluée la consommation dite de « de suivi », ainsi que les économies d'énergie générées par le projet d'amélioration.

De manière idéale, la **période de référence** doit permettre de représenter tous les modes de fonctionnement de l'installation, en couvrant un cycle complet de fonctionnement passant par les consommations maximales et minimales d'énergie. Le choix de cette période de référence est directement affecté par la période de variation des variables explicatives de la consommation d'énergie des équipements contenus dans le périmètre d'évaluation. Ainsi, évaluer les besoins d'énergie nécessaires au chauffage d'un local principalement affecté par les variations du climat impose que, de manière idéale, la période de référence corresponde à une période de variation du climat, c'est-à-dire une année entière. En revanche, certaines consommations d'énergie peuvent avoir une période hebdomadaire, comme les consommations d'électricité ou d'air comprimé nécessaires à la production d'une usine. Dans ce cas, l'évaluation des données correspondantes sur une semaine suffira à déterminer les conditions et la consommation de référence de l'installation ou du site.

On peut également chercher à étendre la période de référence dans le passé, de manière à prendre en compte plusieurs cycles de fonctionnement, et ainsi améliorer a priori la détermination des relations explicatives de la consommation d'énergie. Cela dit, plus on s'éloigne dans le passé, plus les conditions de fonctionnement des installations diffèrent des conditions dans lesquelles fonctionnait l'installation peu avant la réalisation du projet d'amélioration des performances énergétiques. Les périodes très anciennes ne permettent pas d'isoler correctement l'effet du projet d'amélioration des performances énergétiques car elles reflètent également l'évolution des performances des installations dans le temps.

La **période de suivi** doit, quant à elle, être choisie de manière à couvrir au moins un cycle de fonctionnement normal, afin de permettre la caractérisation des performances énergétiques d'une installation dans toutes ses conditions de fonctionnement. Cependant, idéalement, la période de suivi devrait s'étendre sur toute la durée de vie du projet d'amélioration de manière à évaluer la totalité des économies d'énergie générées. Dans le cadre d'un contrat de performance énergétique dans lequel les économies sont contractuellement garanties, elle couvre naturellement la durée de la garantie de résultat portée par le prestataire de services énergétiques.

Enfin, il est envisageable de juxtaposer les périodes de suivi et de référence dans les cas où les améliorations peuvent aisément être alternativement mises en route et arrêtées. Cela permet de réaliser les mesures de consommations d'énergie avant et après réalisation de l'amélioration dans des conditions de fonctionnement stables. Les économies d'énergie peuvent ainsi être directement déterminées par différence entre les deux mesures de consommation. Cela dit, il faut toutefois s'assurer que ces périodes de mesure sont suffisamment longues pour représenter le fonctionnement de l'installation dans des conditions normales, ou pour caractériser l'ensemble des conditions dans lesquelles l'installation est susceptible de fonctionner.

5.1.3 Principe de l'ajustement des consommations

Définition des ajustements

Le terme « ajustements » présent dans l'équation 3.1 désigne les corrections à apporter à une consommation d'énergie pour tenir compte de la variation des conditions de fonctionnement, à la frontière du périmètre d'évaluation, qui ont des répercussions sur les consommations d'énergie, et dont les conséquences ne peuvent pas être mesurées directement. On peut distinguer deux types d'ajustement :

- les **ajustements périodiques**, destinés à rendre compte des variables explicatives de la consommation dont la valeur varie fréquemment sur les périodes de référence ou de suivi, comme la température extérieure sur une journée ou l'activité sur une semaine ;
- les **ajustements non périodiques**, destinés à rendre compte des variables explicatives de la consommation qui évoluent peu ou pas pendant une période de mesure, mais qui pourraient être amenés néanmoins à évoluer entre la période de référence et la période de suivi, c'est-à-dire, après amélioration des performances énergétiques des installations. Il peut s'agir par exemple de la surface ou du volume de locaux chauffés, de l'usage des locaux (type d'équipements ou d'occupants) ou de la caractéristique de leur enveloppe.

Dans la pratique, on détermine rarement des relations explicatives des ajustements à porter à la consommation, mais on recherche plutôt directement des relations explicatives de la consommation d'énergie. D'un point de vue mathématique, nous estimons donc la consommation d'énergie d'un système évalué à l'aide d'une relation explicative déterminée sur la base des observations sur une période d'évaluation donnée de sa consommation d'énergie d'une part et de variables indépendantes caractéristiques de ses conditions de fonctionnement d'autre part.

Cela nous permet donc d'écrire :

$$C_{|I} = f_{|I} (X_{|I}) + \epsilon_I \quad (5.1)$$

$$\hat{C}_{|I} = f_{|I} (X_{|I}) \quad (5.2)$$

avec :

- $C_{|I}$, la consommation réelle du système évalué sur la période d'évaluation I ;
- $\hat{C}_{|I}$, l'évaluation de la consommation sur la période I ;
- $f_{|I}$, le modèle explicatif défini sur cette même période d'évaluation I , permettant de déterminer l'évaluation de la consommation $\hat{C}_{|I}$;
- $X_{|I}$, le vecteur composé des p variables indépendantes $X_{|I}^p$ observées sur la période d'évaluation I ;
- ϵ , l'erreur résiduelle commise par l'évaluation.

Étant donné que, dans le cadre de notre étude, le système évalué est l'objet d'une amélioration de ces performances énergétiques, il est évident que la relation explicative de la consommation varie d'une période d'évaluation à l'autre selon que le projet a été réalisé ou non. La mesure des consommations et de l'évolution des variables indépendantes significatives respectivement sur la période de référence et sur la période de suivi permet donc

de déterminer deux relations explicatives, notées respectivement $f_{|réf}$ et $f_{|suivi}$, définies uniquement sur leur période respective.

En reprenant l'équation 5.1, nous avons donc :

– sur la période de référence :

$$C_{|réf} = f_{|réf} (X_{|réf}) + \epsilon_{|réf} \quad (5.3)$$

– sur la période de suivi :

$$C_{|suivi} = f_{|suivi} (X_{|suivi}) + \epsilon_{|suivi} \quad (5.4)$$

Méthodes d'ajustement

La définition de ces deux relations explicatives, nous permet de mettre en place deux méthodes distinctes pour comparer les consommations d'énergie avant et après réalisation du projet d'amélioration, et déduire les économies d'énergie correspondantes.

Méthode des consommations évitées

Nous pouvons choisir de déterminer la consommation d'énergie du système en l'absence de réalisation du projet d'amélioration, telle qu'elle aurait été si le système sans amélioration avait été évalué dans les conditions de fonctionnement sur la période de suivi. En ajustant ainsi la consommation de la période de référence aux conditions de fonctionnement de la période de suivi, nous déterminons la consommation du système évalué dans un scénario « sans amélioration » (« *Business As Usual* » (*BAU*) dans la terminologie anglaise de la littérature). Par différence avec la consommation d'énergie observée sur la période de suivi après réalisation du projet d'amélioration de l'efficacité énergétique, nous pouvons évaluer une **consommation d'énergie évitée**, notée $\hat{C}_{évitée}$, sur la période de suivi grâce à la réalisation du projet.

Pratiquement, cela se traduit par la relation suivante :

$$\hat{C}_{évitée} = f_{|réf} (X_{|suivi}) - C_{suivi} \quad (5.5)$$

Bien que les économies d'énergie puissent être correctement corrélées aux variations des variables indépendantes comme le climat ou l'activité du site étudié, la valeur de ces économies dépend des conditions de fonctionnement observées sur la période de suivi. Ces économies sont donc variables dans le temps en fonction des aléas sur les conditions de fonctionnement de périodes de suivi ultérieures. Ces économies ne peuvent donc pas être directement comparées à la consommation d'énergie observée sur la période de référence, et en particulier avec la réduction attendue des consommations d'énergie, lesquelles sont déterminées a priori sur la base des observations de la période de référence avant la réalisation du projet d'amélioration.

Méthode des économies normalisées

Si l'on souhaite comparer directement les consommations d'énergie avant et après réalisation des améliorations de l'efficacité énergétique des installations, et donc en particulier comparer les effets réels du projet d'amélioration sur les consommations d'énergie avec ses effets attendus, il convient d'ajuster les consommations observées sur chaque période à des conditions de fonctionnement communes fixes dans le temps. On parle alors de conditions de fonctionnement normales (ou normalisées), notées $X_{|normales}$. De la même manière que pour les consommations évitées, nous déterminons des **économies d'énergie normalisées**, notées $\hat{E}_{normalisées}$:

$$\hat{E}_{normales} = f_{|réf} (X_{|normales}) - f_{|suivi} (X_{|normales}) \quad (5.6)$$

Les conditions normales sont des conditions fixes dans le temps et permettent ainsi de rendre le résultat de l'évaluation indépendant des conditions réelles de fonctionnement des installations durant la période de suivi. C'est pourquoi on parle d'économies d'énergies « normalisées ».

Ces conditions fixes peuvent être choisies comme étant les conditions de la période de référence, considérées comme fixes dès le commencement de la période de suivi. On compare alors la consommation d'énergie observée sur la période de référence avant la réalisation du projet d'amélioration avec l'évaluation de la consommation d'énergie du système évalué après la réalisation du projet d'amélioration dans les conditions de fonctionnement de la période de référence. Le montant de ces économies d'énergie normalisées est alors évalué par la relation :

$$\hat{E}_{normales} = C_{|réf} - f_{|suivi} (X_{|réf}) \quad (5.7)$$

Enfin, on notera que le calcul de ces économies d'énergie normalisées ne peut être réalisé qu'au terme d'une période de suivi couvrant un cycle de fonctionnement complet du système évalué de manière à être en mesure de déterminer la relation explicative de la consommation d'énergie du système après la réalisation des améliorations. Il convient également de vérifier la pertinence de l'échantillon des observations sur lequel la relation explicative de la consommation est déterminée, et notamment que le système que l'on évalue a atteint un régime de fonctionnement stabilisé, après une période initiale de fonctionnement pendant laquelle interviennent couramment des défauts de fonctionnement inhérents au démarrage d'une nouvelle installation.

En revanche, dès que cette période de mise en route a été dépassée et que le système a été observé durant une période de suivi suffisante, il n'est a priori plus nécessaire de poursuivre les observations sur la durée de vie de l'installation ou sur toute la durée du contrat qui accompagne le suivi et l'exploitation des installations améliorées puisque les conditions réelles de suivi n'ont plus d'influence sur le résultat de l'évaluation des économies d'énergie.

5.1.4 Recherche des modèles d'ajustement

Comme nous venons de le voir, l'évaluation des économies d'énergie générées par un projet d'amélioration des performances énergétiques repose sur les relations explicatives déterminées à partir de l'observation, avant et après amélioration, de ces consommations d'énergie et de variables indépendantes. Ces relations explicatives sont bâties à partir de modèles répartis traditionnellement en deux catégories :

- les **modèles de connaissance** ou **modèles directs** : il s'agit de **simuler le comportement** des équipements techniques, du bâtiment ou du site à l'aide de modèles dédiés à la simulation de bâtiment ou des systèmes énergétiques ;
- les **modèles de comportement** ou **modèles inverses** : cette option consiste à rechercher par une **analyse statistique** des relations entre les observations de la consommation d'énergie et des variables indépendantes représentant les caractéristiques des conditions de fonctionnement.

L'utilisation de ces modèles pour l'ajustement des consommations d'énergie à des conditions de fonctionnement données introduit naturellement une incertitude dans le protocole d'évaluation. L'incertitude dans l'évaluation des économies d'énergie peut croître très rapidement en raison de leur détermination par différence de deux grandeurs physiques, lors de l'application des modèles d'ajustement décrits précédemment : les incertitudes s'additionnent donc pour augmenter l'incertitude sur les économies d'énergie.

Utilisation de modèles directs : la simulation calibrée

Les modèles de simulation sont couramment utilisés pour le dimensionnement des bâtiments et des équipements ainsi que pour le calcul prévisionnel de leur consommation. A titre d'exemple pour la simulation des bâtiments, nous pouvons citer les modèles ConsoClim [ConsoClim, 2002], Trnsys [Trnsys, 2007], ou encore Energyplus [Energyplus, 2008]. Dans ces modèles, le fonctionnement des bâtiments et des équipements est décrit par :

- les usages finals du bâtiment ou du site simulé,
- le climat,
- la structure du bâtiment ou du site et des équipements techniques.

Dans le cadre d'un protocole d'évaluation, on distingue traditionnellement les usages finals et le climat d'une part et les données décrivant la structure et les caractéristiques du système évalué d'autre part. Les premiers sont considérés comme des entrées du modèle tandis que les seconds sont considérés comme des paramètres. Enfin, les sorties du modèle sont, outre les consommations d'énergie, les conditions de confort dans les différentes zones du site simulé (cf. figure 5.3).

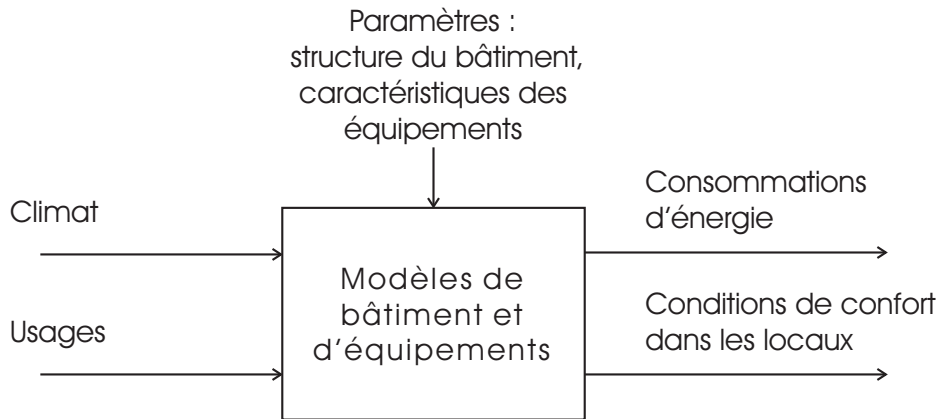


FIG. 5.3 – Représentation schématique des modèles de simulation de bâtiments.

De même, [ASHRAE, 2008] décrit de nombreux modèles de connaissance permettant de représenter le comportement des équipements techniques. On peut également extraire les modèles de comportement des équipements des modèles de simulation de bâtiment. Les quantités d'énergie fournie et consommée, ou le cas échéant la quantité de matière transportée, sont déterminées en fonction des caractéristiques des équipements et de leurs conditions de fonctionnement.

Les paramètres sont traditionnellement documentés par un recueil, sur site ou sur plan, des données décrivant la structure du bâtiment et les caractéristiques des équipements. Il s'agit d'un travail traditionnellement assez long, réalisé par un personnel expérimenté. Les données d'entrée sont mesurées directement, notamment pour le climat, ou déterminées par l'intermédiaire de scénarios d'usage observés sur site ou déclarés par les utilisateurs (occupation des locaux, activité industrielle). Enfin, dans le cadre d'un protocole d'évaluation, les sorties des modèles doivent être comparées avec des données réelles de fonctionnement, et les paramètres et les entrées ajustés de manière à faire converger les résultats de la simulation vers les données réelles : on parle alors de **calibrage** ou de **calage** du modèle.

Ce calibrage peut s'effectuer sur deux horizons temporels distincts grâce aux données mensuelles et aux données horaires. Traditionnellement, pour les bâtiments, les données horaires concernent l'évolution des conditions de confort dans les locaux. Ces données horaires doivent être mesurées ou, à défaut, déclarées par l'occupant. Les données mensuelles peuvent être obtenues par l'intermédiaire des factures énergétiques ou de mesures sur le compteur du distributeur ou sur un sous-compteur spécifique. Le calage sur les données horaires permet principalement de régler le modèle sur les niveaux de puissance appelés, tandis que les données mensuelles permettront un réglage sur le volume d'énergie consommée. Toutes ces données sont comparées avec les sorties des modèles de simulation et les écarts sont évalués en utilisant des techniques de comparaison statistiques et graphiques (cf. section 6.3.3.4 dans [ASHRAE, 2002]).

A l'issue de ce calibrage, l'évaluateur dispose donc d'un modèle explicatif des consommations du bâtiment en fonction de variables représentant le climat et l'usage du bâtiment ou du site d'une part et sa structure d'autre part. Le calibrage d'un modèle de connaissance pour la simulation d'un équipement particulier est réalisé avec la même méthode.

Utilisation de modèles de comportement

La recherche de modèles de régression consiste à déterminer par traitement statistique les relations entre les consommations d'énergie et des variables indépendantes. Ces variables indépendantes sont de la même nature que les entrées, voire les paramètres, des modèles de simulation de bâtiment. Toutefois, l'analyse statistique se restreint souvent à un nombre réduit de variables dites significatives, dont la variation a une influence notable sur la consommation d'énergie. La pertinence d'une variable indépendante dans le modèle de régression peut être évaluée à l'aide du test de la statistique t [Draper, 1966] : l'annexe D de [ASHRAE, 2002] recommande de considérer une valeur critique de la statistique t de 2 afin d'accepter ou de rejeter chaque variable testée.

Pour l'évaluation des consommations d'énergie globales des bâtiments ou des sites industriels, les variables indépendantes couramment choisies sont des caractéristiques du climat ou de l'activité. Il peut donc, par exemple, s'agir :

- de la température extérieure ;
- de l'ensoleillement ;
- des quantités fabriquées par une usine ;
- du nombre de repas servis pour un restaurant ;
- du nombre d'occupants ou des heures d'occupation d'une salle ;
- etc..

Si le périmètre d'évaluation est plus restreint, on cherche habituellement des variables indépendantes caractérisant les conditions de fonctionnement du système pour caractériser son comportement. Cette recherche de variables s'appuie sur l'expérience de l'évaluateur et sa connaissance des mécanismes physiques en jeu dans le fonctionnement de ces équipements.

Les modèles de régression les plus communs sont les modèles linéaires du premier ordre de la forme :

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (5.8)$$

avec :

- \hat{Y} , la variable dépendante expliquée, qui, dans le cas de notre étude, correspond à une quantité d'énergie consommée pendant une période de consommation (1 jour, 1 mois, 1 année) ;
- X_i , les variables indépendantes ($1 \leq i \leq n$, n étant le nombre de variables indépendantes)
- b_0 , un terme constant, correspondant à une consommation d'énergie constante et indépendante des variables considérées dans le modèle de régression ;
- b_i avec $1 \leq i \leq n$, les coefficients correspondants respectivement aux variables indépendantes X_i .

Chaque modèle de régression est déterminé sur la base d'un échantillon de données mesurées, aussi bien en ce qui concerne les consommations d'énergie que les variables indépendantes sélectionnées. La corrélation entre les observations de la consommation d'énergie et les variables sélectionnées est évaluée à l'aide du coefficient de détermination R^2 , dont la valeur comprise entre 0 et 1 indique le taux d'explication par le modèle la variable dépendante évaluée. Bien qu'il n'y ait aucune règle dans ce domaine, une valeur

de 0,75 est souvent considérée comme acceptable.

La relation explicative déterminée sur l'échantillon d'observation peut ensuite être testée à l'aide du test F de Fisher [Draper, 1966]. Ce test permet de déterminer si une corrélation présentant un coefficient de détermination R^2 élevé est le fruit du hasard. Dans le cas où il se révèle négatif, ce test indique une probable omission de variables indépendantes dans le modèle ou que la forme linéaire du modèle n'est pas appropriée. On peut alors recourir à d'autres types de modèles, tels les modèles polynomiaux, ou rechercher des variables indépendantes supplémentaires.

5.1.5 Collecte des données

La collecte des données avant et après réalisation du projet d'amélioration représente un enjeu central d'un protocole d'évaluation puisque, comme nous venons de le voir, c'est sur la base de ces données que sont déterminées les économies d'énergie générées par le projet. Les données à collecter concernent les quantités d'énergie, que le système évalué consomme et doit fournir, et les conditions de fonctionnement du système, auxquelles il faut ajouter, le cas échéant, une évaluation des effets interactifs (cf. figure 5.2).

A cette fin, plusieurs méthodes de collecte des données peuvent être utilisées séparément ou de manière complémentaire :

- l'exploitation des factures d'énergie émises par les fournisseurs d'énergie ou la lecture des compteurs d'énergie existants (en particulier, les compteurs installés par le fournisseur) ;
- la mise en place de compteurs d'énergie dédiés à l'évaluation des grandeurs physiques nécessaires à l'évaluation ;
- la mesure ou l'estimation de paramètres caractérisant les conditions de fonctionnement du système évalué ;
- l'entretien avec les occupants du bâtiment ou les utilisateurs du système évalué.

Ces méthodes sont des méthodes classiques de reconstitution des consommations d'énergie et de collecte des données, couramment utilisées pour la réalisation d'audits énergétiques ([AIE, 1987], [Marchio, 2001]).

Cette collecte des données nécessaire à la mise en place d'un protocole d'évaluation introduit deux sources principales d'incertitude : les **erreurs liées aux instruments de mesure** et les **erreurs d'échantillonnage** des équipements mesurés.

Chaque instrument de mesure est caractérisé par un intervalle d'incertitude de mesure. Cette erreur de mesure peut être accrue par un mauvais calibrage de l'instrument, une mauvaise disposition sur l'installation ou une utilisation inadaptée de l'instrument de mesure. Les installations sont souvent équipées d'instruments de mesure variés, qui peuvent être exploités dans le cadre d'un protocole d'évaluation. L'installation étant déjà équipée, l'évaluateur peut avoir recours à ces instruments par commodité, mais il convient toutefois de vérifier que la précision de ces instruments est bien adaptée à l'évaluation. Certains de ces instruments de mesure ne servent parfois qu'à contrôler qu'une grandeur se situe bien dans la plage de fonctionnement prévue dans le cadre de l'exploitation normale des

installations, mais ne sont pas adaptés à un usage d'évaluation. De plus, la précision des appareils de mesure dérive dans le temps. Par conséquent, l'usage d'appareils de mesure en place sur les installations doit s'accompagner d'un minimum de précaution.

Lorsque le projet d'amélioration de l'efficacité énergétique porte sur un grand nombre d'équipements a priori identiques, la réalisation des mesures ainsi que la détermination des relations explicatives de la consommation d'énergie peuvent parfois être réalisées sur un échantillon de la population d'équipements présents sur le site évalué. Des erreurs peuvent être ainsi introduites si le choix de l'échantillon de cette population d'équipements n'est pas suffisamment représentatif. Notons également qu'une erreur d'échantillonnage peut également être introduite dans le choix de la période de mesure des équipements évalués. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué, les mesures des consommations et des conditions de fonctionnement doivent être réalisées sur une période contenant l'ensemble des modes de fonctionnement des équipements. Un échantillon ne représentant que partiellement ces modes de fonctionnement ne permettra pas une détermination convenable des relations explicatives de la consommation à partir desquelles sont déterminées les économies d'énergie générées par le projet d'amélioration.

Pour déterminer la taille critique de l'échantillon de la population d'équipements à mesurer, on pourra utiliser une méthode simple basée sur le niveau de précision et de confiance recherché (cf. annexe B de [IPMVP, 2007]). Cependant, il est bien évident que l'expérience de l'évaluateur permet de distinguer certaines caractéristiques dans une population d'équipements techniques et par suite de constituer des échantillons plus ciblés. On peut penser par exemple à l'âge des équipements qui influe fortement sur les performances de certains systèmes (échangeurs ou filtres par exemple). Dans ce cas, il convient de constituer autant d'échantillons que de classes d'équipements afin de disposer des données nécessaires à la détermination des relations explicatives de la consommation d'énergie pour chaque classe d'équipements.

5.2 Mise en œuvre des protocoles d'évaluation des économies d'énergie

A partir des principes des protocoles d'évaluation exposés dans le paragraphe précédent, les ouvrages consacrés aux protocoles d'évaluation distinguent trois ou quatre stratégies d'évaluation des économies d'énergie générées par un projet d'amélioration des performances énergétiques d'une installation. Ainsi [ASHRAE, 2002] distingue trois stratégies principales de mise en œuvre, appelées « *approches* », tandis que [IPMVP, 2007] décrit des « *options* » pour la mise en œuvre des protocoles d'évaluation. On distingue donc :

- l'**approche « ensemble du bâtiment »** : elle utilise la mesure de compteur d'énergie finale sur l'ensemble du bâtiment ainsi que les factures mensuelles du fournisseur d'énergie pour la réconciliation des données. Elle correspond à l'option C de [IPMVP, 2007] ;
- l'**approche « isolement des améliorations »** : l'amélioration de l'efficacité énergétique est directement mesurée en isolant le système évalué par des appareils de mesure. Des variantes de cette approche sont envisageables selon que la mesure est continue ou périodique et selon la méthode utilisée pour évaluer les économies d'énergie générées par la répétition à l'identique d'une amélioration sur une population d'équipements. Deux options (A et B) équivalentes à cette approche sont proposées dans [IPMVP, 2007] pour tenir compte de certaines spécificités des équipements considérés isolément ;
- l'**approche « simulation calibrée de l'ensemble du bâtiment »** : elle requiert l'utilisation d'un logiciel de simulation de bâtiment. Une campagne de mesures est menée parallèlement dans le but de collecter les données nécessaires au calibrage (ou calage) de la simulation. Cette approche est équivalente à l'option D de [IPMVP, 2007].

La mise en œuvre de ces différentes approches des protocoles d'évaluation suit le même schéma : après une étape consacrée à la collecte des données concernant la consommation en énergie et les conditions de fonctionnement du système évalué, les étapes suivantes sont consacrées à la définition de la situation de référence et à la détermination des relations explicatives de la consommation d'énergie. Enfin, les dernières étapes sont consacrées à l'ajustement des consommations à des conditions communes des fonctionnement choisies au cas par cas, puis, par suite, au calcul des économies d'énergie.

5.2.1 Approche « ensemble du bâtiment »

Cette approche est destinée à être mise en œuvre sur des sites pour lesquels toutes les données nécessaires pour l'évaluation des performances globales du bâtiment, avant et après réalisation du projet d'amélioration, sont disponibles. Ces données sont obtenues à partir des factures d'énergie délivrées par les fournisseurs d'énergie finale, et à partir de campagnes de mesures continues avant et après réalisation des améliorations.

De plus, cette méthode de calcul est avant tout axée sur l'évaluation des performances du bâtiment et non uniquement sur l'évaluation des améliorations seules.

Collecte des données

La phase de collecte des données débute par l'analyse des factures délivrées par les fournisseurs d'énergie. L'une des difficultés majeures rencontrées dans cette phase est de réconcilier les différentes factures sur une même période. En effet, les échéances de facturation sont propres à chaque fournisseur et spécifiques à la nature des énergies.

De plus, pour les petits comptes, une partie des quantités facturées est estimée et non mesurée. Les factures d'électricité contiennent de plus en plus d'informations et certains fournisseurs proposent désormais à leurs clients des outils de suivi des consommations très complets, permettant la reconstitution des consommations d'électricité journalières voire horaires. Cependant, dans la majorité des cas, les factures d'électricité ainsi que les factures de gaz sont à échéances mensuelles.

En revanche, il est quasiment impossible de reconstituer ce niveau d'information pour les consommations de fioul, car les seuls historiques de consommations a priori disponibles sont les quantités de fioul vendues et comptabilisées lors du remplissage des cuves. Ce remplissage intervient généralement à des intervalles irréguliers, à la demande du client. Il n'est donc pas évident de disposer des consommations de toutes les énergies finales consommées par un bâtiment sur une même période. Le premier objectif sera donc de traiter les données afin de reconstituer toutes les consommations d'énergie d'un bâtiment sur une même période.

De même, il est indispensable que les données soient présentées avec la même résolution temporelle : mensuelle, hebdomadaire, journalière ou horaire. En ce qui concerne l'électricité, il est possible de disposer des consommations horaires, mais on travaillera rarement avec cet intervalle de temps dans le cadre d'une approche « ensemble du bâtiment » car peu de données sont disponibles avec cette résolution temporelle.

Pour remédier au manque de données de consommation sur un intervalle de temps plus réduit (hebdomadaire, voire journalier), il devient indispensable de mettre en œuvre un protocole de mesure spécifique. Ces mesures peuvent bien évidemment être réalisées à partir des compteurs des distributeurs d'énergie finale (électricité et gaz). Il s'agit dans ce cas de faire directement un relevé d'index de ces compteurs soit manuellement, soit à l'aide d'un système de lecture optique que l'évaluateur dispose sur les compteurs existants.

L'inconvénient majeur de la réalisation d'un protocole spécifique de mesure est la durée pendant laquelle il doit être mis en œuvre. Une période d'évaluation d'un système doit représenter tous les modes de fonctionnement du système. *Or, pour un bâtiment, cette période est d'au moins un an car la variable explicative de la consommation d'énergie principale est le climat* dont on peut considérer que la période de variation s'étale sur une année. Cela implique donc que le projet d'amélioration ne pourra pas être réalisé avant 12 mois, ce qui n'est pas toujours acceptable dans le cadre d'une démarche commerciale.

La collecte des données concernant les variables indépendantes explicatives de la consommation d'énergie rencontrent les mêmes difficultés hormis pour la principale d'entre elles, le climat. En effet, les historiques de données météorologiques peuvent être obtenues à partir des relevés des stations météorologiques publiques, ce qui nécessite généralement

un abonnement à un service de diffusion. Dans ce cadre-là, la collecte de données météorologiques journalières est tout à fait réaliste. À défaut, il reste possible de disposer sur site les instruments de mesure nécessaires pour la collecte de ces données.

L'historique des autres variables indépendantes rendant compte des conditions de fonctionnement ne sont pas toujours disponibles. Il s'agit de variables représentant l'occupation du bâtiment ou l'activité industrielle du site, comme le nombre de nuitées d'un hôtel, ou la quantité de produits sortis d'une chaîne de montage. La qualité de ces données est donc soumise à la gestion particulière de chaque utilisateur ou gestionnaire du site évalué.

Si l'on n'est pas en mesure de quantifier l'évolution de ces variables indépendantes, on procède alors à une analyse qualitative dans le but d'identifier les périodes correspondant aux différents modes de fonctionnement. La recherche de relations explicatives de la consommation est ensuite conduite sur chacune de ces périodes, à condition toutefois de pouvoir extraire les consommations d'énergie correspondantes à chaque période. Par exemple, s'il n'est pas possible de quantifier l'occupation d'un immeuble tertiaire (scénarios d'occupation représentant le nombre de personnes présentes ainsi que les durées d'occupation correspondantes), il est toujours possible de distinguer les périodes des jours ouvrés des périodes de jours fériés. On recherche alors des relations explicatives de la consommation sur chaque mode de fonctionnement identifié.

Développement du modèle explicatif de la consommation

A partir des données collectées, une analyse statistique est menée de manière à relier la consommation d'énergie à des variables indépendantes identifiées. Étant donné qu'un bâtiment peut être alimenté par plusieurs sources d'énergie, une analyse statistique est menée pour chaque énergie, voire sur chaque compteur ou sous-compteur. Dans le cadre de l'approche « ensemble du bâtiment » des protocoles d'évaluation, les modèles explicatifs les plus utilisés sont des modèles linéaires du premier ordre décrits par l'équation 5.8.

Le meilleur modèle est sélectionné parmi les résultats de l'analyse statistique à l'aide des critères statistiques précisés dans le tableau 5.1.

La résolution temporelle de ces relations explicatives dépend naturellement de celle des données collectées : par exemple, des données mensuelles permettent seulement d'expliquer des consommations sur le même horizon temporel. Si l'on travaille avec des données mensuelles, il convient en effet d'être particulièrement vigilant au poids des différents points des séries de données. En effet, dans ce cas, les données ne représentent pas la même fraction du profil de consommation du système évalué : le poids des points varie avec le nombre de jours contenus dans les différents mois du calendrier. Une régression linéaire simple n'est pas correcte, et il convient alors de procéder à une régression pondérée (cf. Annexe D dans [ASHRAE, 2002]).

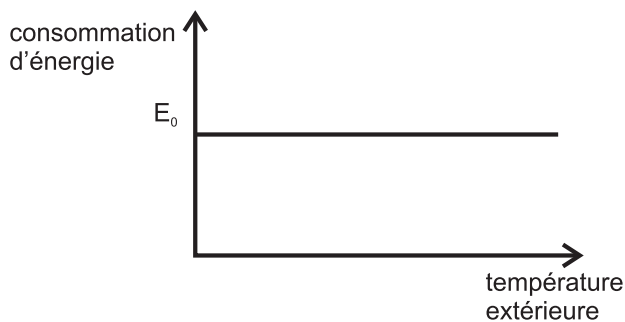
Critère statistique	Abréviation	Valeur limite
Coefficient de détermination	R^2	$\geq 0,75$
Coefficient de variation relative de l'erreur-type	$CV(s_e)$	$\leq 15\%$
Biais moyen	BM	$\pm 7\%$
Test-t	$test - t$	≥ 2 ¹

TAB. 5.1 – Critères statistiques pour la sélection des modèles de régression explicatif de la consommation d'énergie dans le cadre de l'approche « ensemble du bâtiment » (d'après [FEMP, 2008]).

Par ailleurs, on procède rarement à une régression multiple dans le cadre de cette approche, d'une part, car la principale variable explicative de la consommation d'énergie d'un bâtiment donné est une donnée relative au climat, et d'autre part, car l'observation et la quantification des autres variables explicatives possibles ne sont pas évidentes. Cette variable peut prendre plusieurs formes : il peut s'agir de la température extérieure directement, ou de la température humide, mais cette variable climatique peut également s'exprimer sous la forme du nombre de degrés-jours. Par suite, de nombreux modèles ont été développés pour expliquer la relation entre consommation d'énergie et climat. [ASHRAE, 2005] propose cinq formes de modèles explicatifs que nous avons représentés sur la figure 5.4.

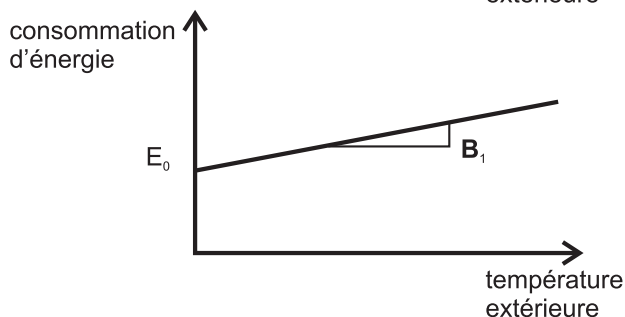
Nous remarquons que ces modèles ne permettent pas de représenter le comportement dynamique d'un bâtiment. La seule composante climatique considérée est la température extérieure, ce qui néglige, par exemple, les effets de la variation de l'ensoleillement dans une journée. De même, l'effet de l'inertie des bâtiments n'est pas représenté par ces simples modèles linéaires. Nous pouvons donc nous attendre à rencontrer quelques difficultés pour déterminer les relations explicatives de la consommation d'énergie à l'aide de régressions linéaires sur un intervalle de temps inférieur à une journée : nous nous attendons en effet à une dispersion des résultats trop importante pour répondre aux valeurs limites présentées dans le tableau 5.1.

¹La valeur seuil de 2 pour le test-t de Student est recommandée par [IPMVP, 2007]. Dans l'esprit de ce document, la recherche des relations explicatives de la consommation des bâtiments, et les tests statistiques qui l'accompagnent, sont réalisés sur des échantillons composés d'un grand nombre de points. Une valeur de t égale à 2 équivaut à un intervalle de confiance de 5% pour un échantillon d'au moins 60 points, plus précisément si le nombre de degrés de liberté (c'est-à-dire, la taille de l'échantillon moins le nombre de variables indépendantes) est égal à 60. Cet intervalle de confiance descend à 10% avec des degrés de liberté réduit à 5, pour une valeur de t égale à 2,015.



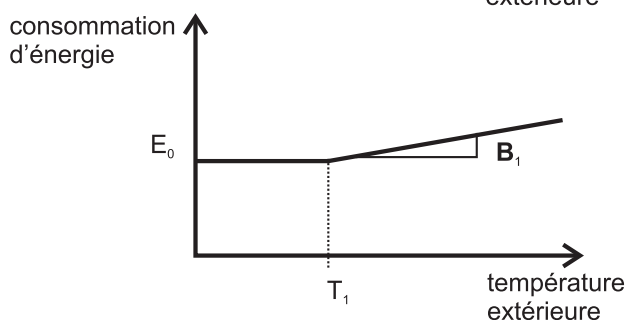
Modèle à 1 paramètre

$$E = E_0$$



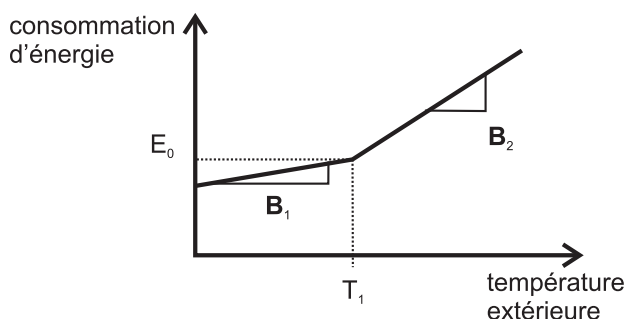
Modèle à 2 paramètres

$$E = E_0 + B_1.T$$



Modèle à 3 paramètres

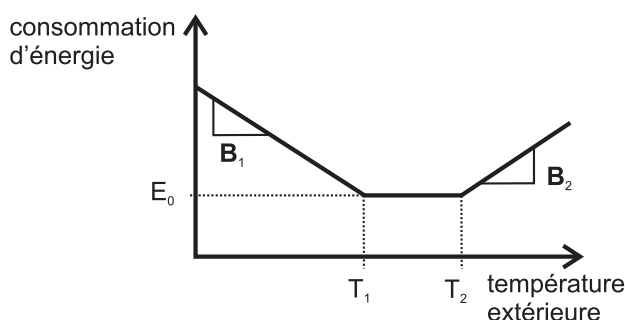
$$E = E_0 + B_1.(T - T_1)^+$$



Modèle à 4 paramètres

$$E = E_0 + B_1.(T - T_1)^+ \quad \text{si } T \leq T_1$$

$$E = E_0 + B_2.(T - T_1)^+ \quad \text{si } T \geq T_1$$



Modèle à 5 paramètres

$$E = E_0 - B_1.(T - T_1)^+ \quad \text{si } T \leq T_1$$

$$E = E_0 + B_2.(T - T_2)^+ \quad \text{si } T \geq T_2$$

$$E = E_0 \quad \text{si } T_2 \geq T \geq T_1$$

Remarque : le signe + en exposant des parenthèses dans les équations indique que seules les valeurs positives de la grandeur entre parenthèses sont comptabilisées.

FIG. 5.4 – Modèles de régression linéaire pour l'approche « ensemble du bâtiment » (d'après [ASHRAE, 2008]).

Calcul des économies d'énergie

Conformément à ce nous avons décrit dans le paragraphe 5.1.3, le processus réalisé sur la période de référence doit être reproduit sur la période de suivi afin d'évaluer les performances du bâtiment après réalisation du projet d'amélioration. Selon la méthode choisie (« consommations d'énergie évitées » ou « économies normalisées »), la collecte des données par l'intermédiaire d'un protocole de mesure ou par analyse des factures est reconduite sur une année ou davantage. Dans le cas où la méthode « économies normalisées » est choisie, il est important de soigner cette collecte des données et notamment de vérifier que le fonctionnement du bâtiment sur l'année suivant la réalisation de l'amélioration est représentatif. Cette collecte porte bien évidemment au moins sur les mêmes variables indépendantes que celles de la période de référence.

Les relations explicatives de la consommation du bâtiment après amélioration sont naturellement déterminées avec la même méthodologie, sur la base de l'observation des mêmes grandeurs. Les économies d'énergie sont alors calculées par différence entre les consommations d'énergie ajustées au besoin à la température selon la méthode de calcul choisie. Dans le cas où la méthode « économies normalisées » est utilisée pour mener ces calculs, la question du choix du climat de référence se pose. Vu la variabilité du climat d'une année sur l'autre, il est en effet hasardeux de considérer le climat d'une année particulière comme climat de référence dans le cadre de cette méthode de calcul. Il faut alors recourir aux historiques des relevés météorologiques diffusés par la météorologie nationale, qui fournit une moyenne des données climatiques sur une période de 30 ans.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu, les données disponibles ne permettent la prise en compte que d'un nombre réduit de variables indépendantes. Cette représentation partielle des conditions de fonctionnement des bâtiments ne permet donc pas d'expliquer l'ensemble des variations de la consommation d'énergie du bâtiment. La dispersion sur la consommation d'énergie expliquée, et par conséquent l'incertitude de cette approche, sont a priori relativement importantes. [ASHRAE, 2002] *recommande donc de réserver cette approche pour évaluer les économies d'énergie réalisées par des projets d'amélioration dont le gain attendu est au moins équivalent à 10 % de la consommation totale du bâtiment.*

Enfin, il n'est pas exclu qu'il faille étendre cette collecte à d'autres variables dans le cas où le bâtiment est profondément modifié par le projet d'amélioration. Ainsi, si le bâtiment est agrandi par exemple, il doit être prévu de disposer un sous-compteur pour isoler la consommation de la nouvelle partie du bâtiment et la soustraire aux consommations totales du site mesurées par le compteur principal. Cette prise en compte des modifications du site se complexifie lorsqu'un nouvel usage apparaît dans le bâtiment suite au projet d'amélioration. On peut ainsi imaginer qu'un projet de réhabilitation prévoit d'installer des installations pour la climatisation des locaux après avoir rénové les installations de chauffage ou renforcé l'isolation du bâtiment. Dans cet exemple, les relations explicatives des consommations d'énergie après réhabilitation du bâtiment doivent permettre d'isoler les consommations d'énergie dues au nouvel usage de la climatisation qui n'existait pas durant la période de référence.

Ne disposant pas de base de comparaison, les conséquences de ce nouvel apport peuvent être déterminées par d'autres méthodes allant du calcul de charges thermiques associé à

une évaluation du rendement de l'installation, jusqu'à l'utilisation de modèles de simulation. On en déduit donc une limite de ce protocole d'évaluation : la prise en compte de modifications importantes du site peut difficilement être réalisée par l'approche statistique sur lequel repose le protocole d'évaluation.

C'est pourquoi cette approche des protocoles d'évaluation est particulièrement adaptée pour évaluer les économies d'énergie de bâtiment ou de site dont l'usage est relativement constant ou pour lequel les relations explicatives sont suffisamment détaillées pour pouvoir ajuster convenablement les consommations d'énergie. Dans les cas contraires, il faut recourir à l'une des autres approches que nous allons décrire dans la suite de ce document.

5.2.2 Approche « isolement des améliorations »

Cette approche vise à calculer les économies d'énergie générées par un projet d'amélioration sur un équipement particulier, pris isolément de l'installation dont il fait partie et du bâtiment ou du site dans lequel est réalisé le projet d'amélioration. Nous allons voir que cette méthode adapte les principes décrits dans le paragraphe 5.1 aux spécificités du fonctionnement des équipements et propose une méthodologie de calcul pour l'évaluation des économies d'énergie d'une population d'équipements sur lesquels est réalisée une amélioration identique et fonctionnant dans des conditions similaires.

Le fonctionnement des équipements techniques considérés isolément est a priori moins complexe à appréhender que le fonctionnement d'un bâtiment dans son ensemble. Néanmoins, la complexité de l'évaluation des performances d'un équipement varie d'un équipement à l'autre, en fonction de sa sensibilité aux caractéristiques de son environnement (température ambiante, température humide, température des fluides en entrée et en sortie de l'équipement) d'une part, et de la demande énergétique que le système doit fournir ou transporter.

Afin de définir la méthode appropriée pour l'évaluation des performances des équipements, on peut caractériser le fonctionnement d'un équipement sur les différentes périodes d'observation (référence et suivi) en répondant aux questions suivantes :

- la puissance que le système doit fournir est-elle variable ou constante sur une période d'évaluation ?
- la durée de fonctionnement du système est-elle constante quelle que soit la période d'évaluation, ou varie-t-elle ?
- les performances énergétiques du système dépendent-elles des caractéristiques de l'environnement ?

On considère qu'une grandeur est constante sur une période d'observation si sa valeur ne varie pas de plus de 5 % en valeur absolue.

Il va de soi que l'évaluation d'un système dont la durée de fonctionnement et la puissance demandée sont variables d'une part, et dont la performance énergétique est dépendante des caractéristiques de l'environnement d'autre part, requiert la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation plus important que pour un système fonctionnant à puissance et durée de fonctionnement constantes et dont la performance énergétique ne dépend pas de l'environnement. Nous allons voir par la suite comment cela se traduit concrètement

dans la collecte des données, la recherche de modèles explicatifs et dans le calcul des consommations.

Effets interactifs

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 5.1.1, l'évaluation des performances énergétiques et des économies générées par un projet d'amélioration sur un système, au moyen de l'approche « isolement » nécessite la quantification des effets interactifs entre le système et son environnement. L'un des principaux effets interactifs décrit par la littérature (cf. [Rundquist, 1993]) concerne l'interaction entre l'éclairage et les charges de climatisation et de chauffage. Cependant, d'autres effets interactifs peuvent être identifiés comme la variation d'efficacité d'un échangeur suite à une variation de débit des fluides qui le traversent.

[Filfli, 2006] présente également les résultats issus d'une campagne de simulation de la consommation des immeubles de bureaux, et en particulier des valeurs des effets générés par les interactions entre les différents équipements, sur les postes de consommation de ces bâtiments. Dans ce document, la consommation d'énergie d'un immeuble de bureaux est répartie de la manière suivante :

- consommation d'énergie frigorifique, C_{froid} ;
- consommation de chauffage, C_{ch} ;
- consommation d'éclairage, $C_{écl}$;
- consommation des auxiliaires de centrales de traitement d'air, $C_{aux\ CTA}$;
- consommation des auxiliaires des unités terminales, $C_{aux\ term}$;
- consommation des auxiliaires des réseaux de distribution, $C_{aux\ rés}$;
- consommation des équipements de bureautique, C_{bur} .

Par ailleurs, ces travaux évaluent les effets de 13 variables caractéristiques d'un bâtiment neuf sur les différents postes de consommation d'énergie. Nous notons que la détection des effets interactifs est requise uniquement lors de l'utilisation de l'approche « isolement ». Or cette approche est particulièrement adaptée à l'évaluation des améliorations réalisées sur les équipements. C'est pourquoi, nous ne retenons que les variables caractéristiques des installations parmi les variables étudiées dans [Filfli, 2006] :

- mode de gestion et efficacité des équipements de bureautique, G_{bureau} ;
- gestion et efficacité de l'éclairage, Ecl ;
- réduction de débit d'air neuf, V_{ent} ;
- rendement des ventilateurs et pompes, η_{aux} ;
- rendement de la chaudière, η_{chaud} ;
- rendement de l'appareil de production frigorifique, η_{froid} ;
- isolation des réseaux de distribution, $ISO_{rés}$.

Des scénarios d'évolution de ces variables ont été construits pour mener l'analyse de sensibilité dans [Filfli, 2006] : les valeurs des variables évoluent ainsi entre les valeurs minimales de respect de la réglementation thermique française¹ (RT2000) et des valeurs représentant les meilleures solutions techniques existantes sur le marché.

¹Réglementation en vigueur au moment de la réalisation de ces travaux

Il nous semble cependant qu'un poste de consommation n'a pas été considéré dans cette analyse : il s'agit de la consommation des auxiliaires des équipements d'évacuation de la chaleur produite par les machines frigorifiques à condensation à eau. Dans le cas des machines frigorifiques à condensation à air, la consommation d'énergie des ventilateurs est comptabilisée dans la consommation d'énergie du groupe frigorifique (cf. chapitre 7). En revanche, la consommation d'énergie des ventilateurs des tours de refroidissement indispensables au fonctionnement de groupes frigorifiques à condensation à eau n'a pas été prise en compte dans [Filfli, 2006]. Si cette consommation peut être négligée à l'échelle du bâtiment, nous allons montrer, à l'aide du calcul qui suit, qu'elle peut plus difficilement l'être quand on la rapporte à la consommation d'énergie pour la production de froid.

En reprenant les hypothèses des simulations décrites dans [Filfli, 2006], les machines frigorifiques ont une efficacité frigorifique (EER) moyenne de 2,8, ce qui signifie que pour un kilowattheure d'électricité consommé, 2,8 kWh d'énergie frigorifique sont produits et 3,8 kWh d'énergie frigorifique doivent être évacués. Or d'après [IPPC, 2001], nous pouvons considérer, en première approche, que la puissance électrique appelée par les auxiliaires des équipements pour l'évacuation de la chaleur (pompes et ventilateurs), est comprise entre 30 et 50 kW par MW d'énergie calorifique évacuée. Ainsi, pour un kilowattheure d'électricité consommé par une machine frigorifique, la consommation typique des auxiliaires d'une tour de refroidissement est comprise entre 114 et 190 Wh , soit entre 11,4 et 19 % de la consommation d'énergie pour la production d'énergie frigorifique.

D'après [Filfli, 2006], les auxiliaires de réseau représentent 20 % de la consommation d'énergie pour la production d'énergie frigorifique, ce qui est équivalent à la consommation des auxiliaires des équipements d'évacuation de la chaleur dans certains cas. On ne peut donc pas exclure ces consommations de la méthode de détection des effets interactifs que nous allons proposer.

Nous ne reproduisons pas les valeurs obtenues dans le cadre particulier de [Filfli, 2006], mais nous proposons de les présenter sous forme qualitative dans le tableau 5.2.2 permettant de lire l'importance de l'impact sur les différents postes de consommation, de la réalisation d'un projet d'amélioration sur une partie des installations techniques. Nous introduisons tout de même une échelle de valeur entre :

- **les effets interactifs significatifs** (notés \Downarrow ou \Uparrow) : un projet d'amélioration a un effet interactif significatif sur un poste de consommation quand cet effet représente, en valeur absolue, plus de 10 % de l'amélioration globale sur la consommation du bâtiment ;
- **les effets interactifs modestes** (notés \downarrow ou \uparrow) : par complémentarité avec la catégorie précédente, un projet d'amélioration a un effet modeste quand l'impact sur un poste de consommation est inférieur à 10 %, en valeur absolue, de l'amélioration globale sur la consommation du bâtiment. L'impact de ces effets étant faible en regard de l'amélioration globale de consommation du bâtiment, il est possible de les négliger lors d'une évaluation des économies d'énergie par l'approche isolement.

Pour compléter ces résultats par la prise en compte des effets interactifs sur les consommations des auxiliaires des équipements d'évacuation de la chaleur ($C_{aux\ évac}$), nous considérons simplement que cette consommation est une fraction de la consommation d'énergie

pour la production de froid (nous considérons une valeur moyenne de 15 %), ce qui nous permet de quantifier ces effets interactifs sur l'échelle de valeur décrites précédemment.

Variable modifiée par le projet d'amélioration	Effets interactifs sur les différents postes de consommation							
	C_{froid}	C_{chauf}	$C_{écl}$	$C_{aux\ CTA}$	$C_{aux\ term}$	$C_{aux\ rés}$	C_{bur}	$C_{aux\ évac}$
G_{bureau}	↓↓	↑↑			↑		↓↓	↓
Ecl	↓↓	↑↑	↓↓		↑			↓
$Vent$	↑	↓↓		↓↓	↓			↑
η_{aux}	↓↓	↑↑		↓↓	↓↓	↓		↓
η_{chaud}		↓↓						
η_{froid}	↓↓							↓↓
$ISO_{rés}$	↓	↓↓			↓			↓

Exemple de lecture : dans le cas d'une amélioration des performances des équipements de bureau, l'évaluation de la consommation de ces équipements doit obligatoirement être accompagnée d'une évaluation des effets interactifs sur les consommations de froid et de chauffage. En revanche, les effets interactifs sur les consommations des auxiliaires des unités terminales peuvent être négligés si leur évaluation ne peut être réalisée simplement.

TAB. 5.2 – Table pour la détection des effets interactifs d'un projet d'amélioration dans un immeuble de bureaux

Pour les effets interactifs significatifs détectés à l'aide du tableau 5.2.2, il convient de donc de mettre en place une procédure d'évaluation adaptée. Dans les cas où ces effets ne sont pas évaluables simplement, il faut alors envisager d'adapter le périmètre d'évaluation voire de remettre en cause l'approche choisie. En effet, pour les interactions les plus complexes, seule la simulation de tout ou partie de l'installation permettra d'obtenir une évaluation convenable.

Systèmes à performance indépendante de l'environnement

Si la performance énergétique du système ne dépend pas des caractéristiques de l'environnement, la demande énergétique reste la seule variable susceptible d'expliquer la consommation du système évalué. La recherche de modèles explicatifs du fonctionnement des systèmes revient donc à trouver la relation entre la puissance demandée au système et la puissance appelée par le système.

Les relations explicatives de la consommation d'énergie peuvent être représentées par des modèles directs ou indirects (cf. paragraphe 5.1.4). Cependant, dans la plupart des cas, la définition des caractéristiques des équipements est généralement encadrée par des normes d'essais et des programmes de certification des performances. A partir de ces caractéristiques certifiées disponibles sur les documents des constructeurs, il est donc possible, comme le suggère [IPMVP, 2007] de reconstituer directement tout ou partie de la relation

explicative de la performance du système évalué, dans la mesure où l'écart entre les conditions réelles de fonctionnement du système et les conditions d'essais n'introduit pas de différence significative dans les performances testées en laboratoire et les performances in situ. *On considère alors que la performance des équipements est estimée* (option A dans [IPMVP, 2007]). Il convient toutefois de reporter l'incertitude du protocole d'essai mis en œuvre en laboratoire pour l'évaluation de la performance de l'équipement dans le calcul d'incertitude du protocole d'évaluation. Cette méthode est particulièrement adaptée pour estimer la performance des équipements pour l'éclairage, ou des pompes et ventilateurs par exemple.

Dans les cas où les données certifiées ne sont pas disponibles, un protocole de mesure devient indispensable, soit pour déterminer directement la relation entre performance et demande énergétique à l'aide d'une analyse statistique des données mesurées, soit pour calibrer une relation explicative construite à partir de modèles de connaissance. *La performance des équipements est alors mesurée* (option B dans [IPMVP, 2007]). De même, le recours à la mesure peut s'avérer indispensable dans le cas où le système évalué est vétuste. En effet, la certification des performances concerne des équipements neufs et pour certains types d'équipements, la dérive des performances peut être importante.

Par ailleurs, notons que la mise en œuvre d'un protocole de mesure peut être rendue difficile pour des équipements peu accessibles par exemple. De même, certains protocoles de mesures nécessitent d'effectuer quelques opérations gênantes, notamment s'il s'agit de mesures intrusives (mesure de débit dans une gaine par exemple), ce qui n'est pas toujours bien accepté par les exploitants ou les propriétaires des installations.

Le calcul des économies d'énergie est réalisé suivant les méthodes exposées au paragraphe 5.1.3. Comme nous l'avons vu, il est indispensable de reconstituer le profil de la demande énergétique sur chaque période d'évaluation pour comparer les consommations d'énergie à conditions de fonctionnement égales. Comme la puissance consommée du système est entièrement déterminée par la puissance demandée au système (et réciproquement), il suffit de mesurer la puissance appelée par exemple pour être en mesure de reconstituer le profil de la demande énergétique imposée au système (et réciproquement). Ainsi, dès que les relations explicatives ont été mesurées ou estimées, il est possible d'alléger le protocole de mesure en ne conservant plus qu'une seule mesure indispensable à l'évaluation.

Cette caractéristique est d'autant plus intéressante si le projet d'amélioration est reproduit sur un grand nombre d'équipement fonctionnant de manière simultanée, car elle permet de réduire les dispositifs de mesures à déployer en les limitant à un échantillon représentatif des équipements concernés par le projet d'amélioration. La grandeur mesurée pour quelques équipements devient alors une grandeur estimée pour les autres équipements. Cette méthodologie est par exemple employée pour l'évaluation des projets d'amélioration de l'éclairage des locaux. Les puissances consommées avant et après amélioration seront estimées à l'aide des valeurs affichées par les constructeurs, tandis que la durée de fonctionnement dans un local pourra être estimée pour l'ensemble des équipements installés à partir d'une mesure réalisée sur un seul équipement, à condition que tous ces équipements soient commandés simultanément

Un cas particulier : les systèmes fonctionnant à charge constante

Si la puissance demandée au système est constante sur une période d'évaluation, alors la puissance appelée par le système l'est également. Il suffit de connaître les caractéristiques d'un seul point de fonctionnement sur une période d'évaluation pour être en mesure de caractériser entièrement la performance du système évalué sur cette période. *La consommation d'énergie de ces systèmes sur une période d'évaluation est donc entièrement déterminée par la connaissance de cette puissance appelée sur un point de fonctionnement inclus dans la période d'évaluation, et de la durée de fonctionnement du système sur cette période.* Cette propriété est d'autant plus intéressante lorsque les équipements évalués fonctionnent à puissance nominale car l'estimation du point de fonctionnement est directe.

Ces consommations d'énergie doivent ensuite être ajustées à des conditions de fonctionnement communes. Comme le taux de charge est constant, ces conditions dépendent uniquement de la durée de fonctionnement du système. Les consommations d'énergie sont donc évaluées à partir de la différence de puissance appelée avant et après la réalisation de l'amélioration et de la durée de fonctionnement de la période de référence ou de suivi selon la méthode d'ajustement choisie (cf. paragraphe 5.1.3).

La quantification de ces paramètres peut être réalisée par mesure in situ ou par estimation. En effet, la puissance appelée et la durée de fonctionnement peuvent être directement mesurées au moyen d'un protocole de mesure léger sur chacune des périodes d'évaluation (référence et suivi). Cependant, dans certains cas, l'option A de [IPMVP, 2007] propose d'estimer l'un ou l'autre des paramètres non concernés par le projet d'amélioration lorsqu'il n'est pas attendu que ce paramètre évolue de façon notable entre la période de référence et la période de suivi. Par exemple, lors du redimensionnement d'un équipement surdimensionné, la durée de fonctionnement n'est a priori pas appelée à évoluer. On peut donc profiter du caractère constant de ce paramètre pour reporter sa mesure d'une période d'évaluation à l'autre, et se dispenser de prolonger la campagne de mesures.

Dans la pratique, on retient souvent la mesure sur la période de suivi du paramètre constant pour quantifier ce paramètre sur la période de référence, plutôt que l'inverse. Cela permet de réduire le délai de mise en œuvre de l'amélioration, surtout s'il s'agit, par exemple, de la durée de fonctionnement, laquelle ne peut être évaluée qu'à partir de la mesure sur l'ensemble de la période d'évaluation. La période de référence ne sera consacrée qu'à la mesure avant la réalisation du projet d'amélioration du paramètre variable afin de définir sa valeur de référence.

Systèmes à performance variable selon les caractéristiques de l'environnement

Contrairement à la catégorie de systèmes présentée précédemment, la performance de ces systèmes dépend non seulement du taux de charge mais également des caractéristiques de l'environnement. C'est par exemple le cas des groupes de production d'eau glacée dont les performances dépendent, pour un groupe donné, du taux de charge, mais également des températures de l'eau en entrée du condenseur et en sortie de l'évaporateur. Les relations explicatives de la performance de ces équipements sont donc plus complexes.

D'ailleurs, les performances certifiées par les constructeurs présentent rarement l'en-

semble de ces relations explicatives, mais seulement une partie de données. Traditionnellement, nous pouvons y trouver les performances certifiées à pleine charge en conditions nominales et éventuellement quelques données pour le fonctionnement à pleine charge en conditions non nominales, comme nous le verrons dans le chapitre suivant dans le cas des groupes de production d'eau glacée. Il est donc, en général, nécessaire de réaliser une campagne de mesures pour recueillir des données en vue d'une analyse statistique ou de recourir à des modèles de connaissance (simulation calibrée) pour déterminer les relations explicatives de la performance de ces équipements.

La recherche de ces modèles explicatifs peut représenter une charge de travail importante. Cependant, en comparaison avec l'approche « ensemble du bâtiment », les périodes de référence et de suivi sont généralement plus courtes car, pour la plupart des équipements, il est possible d'observer les différents modes de fonctionnement d'un système dans un intervalle de temps inférieur à un an. Ceci permet de réduire d'autant les campagnes de mesures sur ces équipements.

5.2.3 Approche « simulation calibrée de l'ensemble du bâtiment »

Cette approche (option D dans [IPMVP, 2007]) consiste à recourir à un logiciel de simulation pour reconstituer les consommations d'énergie d'un site. Les principes de cette méthode ont été décrits dans le paragraphe 5.1.4.

Cette option est particulièrement utile dans le cas où les données de la période de référence ne sont pas disponibles ou lorsque le site est sujet à de très fortes modifications pendant la phase de suivi et que les relations explicatives déterminées par des modèles de comportement ne permettent plus de représenter les conséquences de ces changements sur les consommations d'énergie.

La simulation calibrée semble représenter une solution avantageuse par rapport aux approches d'isolement des améliorations dans le cas où les effets interactifs sont nombreux ou complexes. En élargissant le périmètre d'évaluation, les effets interactifs sont directement intégrés dans le calcul par le logiciel de simulation du bâtiment.

De même, une approche « simulation calibrée » offre davantage de liberté et permet notamment de simplifier la détermination des économies d'énergie car elle permet de juxtaposer les périodes de suivi et de référence en effectuant les simulations avec et sans les améliorations de la performance énergétique dans les mêmes conditions de fonctionnement. De plus, la simulation offre la possibilité d'évaluer les performances de projets d'amélioration de manière indépendante, lorsque un bâtiment subit de nombreuses améliorations sur différents types d'équipements. Au lieu de réaliser plusieurs protocoles d'évaluation par l'approche « isolement », on peut préférer utiliser cette approche globale simulée par un logiciel de simulation du bâtiment.

Cependant, comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe 5.1.3, cette approche ne peut être réalisée que par du personnel qualifié dans l'utilisation de logiciels de simulation du bâtiment. De plus, la mise au point du modèle représentant le bâtiment évalué requiert un long travail de description du bâtiment. Dans le cas où la méthode d'ajuste-

ment « consommation évitée » est sélectionnée, la phase de suivi doit intégrer des visites régulières de site afin de rapporter dans la simulation tous les changements de configuration du bâtiment qui pourraient intervenir.

Synthèse

Nous avons synthétisé les caractéristiques des approches que nous venons de voir pour la mise en œuvre pratique des protocoles d'évaluation dans le tableau 5.3.

Caractéristiques	Mise en œuvre des protocoles d'évaluation (ou options de [IPMVP, 2007])			
	Ensemble du bâtiment (option C)	Isolement des améliorations avec mesure de tous les paramètres (option B)	Isolement des améliorations avec mesure et estimation des paramètres (option A)	Simulation de l'ensemble du bâtiment (option D)
Capacité à évaluer les économies d'énergie d'un projet d'amélioration en particulier	non	oui	oui	oui
Capacité à prendre en compte des ajustements complexes	modeste	oui	modestes ou la performance du système évalué est peu sensible aux conditions de fonctionnement	oui
Nature du système évalué	tout composant d'un bâtiment ou d'un site	uniquement les équipements techniques	uniquement les équipements techniques	tout composant d'un bâtiment ou d'un site
Compétences particulières requises pour les évaluateurs	réalisation d'audits énergétiques	réalisation de protocoles complexes de mesures et de simulations	réalisation de mesures simples	utilisation de logiciels de simulation du bâtiment
Capacité à prendre en compte des effets interactifs complexes	oui	non ou effets interactifs limités pouvant être mesurés ou ignorés	non ou effets interactifs limités pouvant être mesurés ou ignorés	oui
Période de référence la plus adaptée	un an ou recueil des factures énergétiques si disponibles	représentative des modes de fonctionnement	représentative des modes de fonctionnement ou réduite au temps d'un inventaire	un an ou recueil des factures énergétiques si disponibles
Période de suivi la plus adaptée	au moins un an	au moins un an	au moins un an sauf si la durée de fonctionnement n'est pas impactée par l'amélioration	rien ou durée de vie de l'amélioration (suivant la méthode d'ajustement choisie)

TAB. 5.3 – Caractéristiques des approches ou options des protocoles d'évaluation.

5.2.4 Sélection d'un protocole d'évaluation

L'ensemble des principes que nous avons vu dans le début de ce chapitre doit permettre de définir et de mettre en œuvre un protocole d'évaluation quelles que soient les configurations rencontrées. Comme nous l'avons vu, les approches décrites dans le paragraphe 5.2 requièrent la mise en œuvre de moyens de qualité et en quantités variables selon le type et l'ampleur du projet, le type d'usage final concerné et l'exigence de précision dans la détermination des économies d'énergie. Il convient donc de choisir l'approche qui permet d'assurer cette précision tout en maîtrisant les coûts de cette évaluation.

De manière générale, l'augmentation des moyens mis en œuvre et de leur qualité permet de maîtriser l'incertitude. Dans le même temps, le coût d'un protocole d'évaluation augmente a priori avec la quantité et la qualité des moyens mis en œuvre. Le choix d'un protocole d'évaluation qui s'effectue sous cette double contrainte technique et économique, amène donc les prestataires à réaliser des arbitrages. Dans ce qui suit, nous allons donc succinctement établir la nature des sources d'incertitude et de coût des protocoles d'évaluation, et reprendre à notre compte des éléments d'aide à la sélection des options de [IPMVP, 2007].

Incertitudes des protocoles d'évaluation

Comme nous l'avons indiqué précédemment dans le paragraphe 5.1.5, les protocoles de mesures sont susceptibles d'introduire deux types d'erreur : les erreurs dues aux instruments de mesure eux-mêmes, et les erreurs liées à l'échantillonnage des équipements mesurés, notamment pour les évaluations par isolement des améliorations. A ces incertitudes classiques de la mesure, s'ajoutent les incertitudes introduites par les méthodes de reconstitution des consommations à partir des factures énergétiques. Les formats sous lesquels sont disponibles ces factures ne sont pas homogènes selon le type d'énergie et selon les fournisseurs.

Nous pouvons également mentionner les incertitudes liées aux relations explicatives, que celles-ci aient été établies par analyse statistique sur les données recueillies ou par l'intermédiaire de modèles de connaissance calibrés sur ces mêmes données. Nous rappelons que certaines valeurs peuvent être estimées (option A de [IPMVP, 2007]) et que cette estimation constitue également une source d'erreur. Enfin, il faut également noter les incertitudes liées à la détermination des effets interactifs.

[IPMVP, 2007] précise que l'incertitude d'un protocole d'évaluation peut être considéré comme acceptable et que les économies peuvent être considérées comme « statistiquement valides » si la valeur des économies est significative par rapport à la distribution de l'erreur commise par l'évaluation. Plus précisément, l'évaluation des économies devraient être « deux fois plus importante que l'erreur-type de la valeur de la consommation de référence » pour être acceptée.

Coût des protocoles d'évaluation

Le coût des protocoles d'évaluation augmente naturellement avec :

- les moyens matériels mis en œuvre sur le terrain ;
- la qualité et la quantité de main d'œuvre nécessaire à la réalisation du protocole avant ou après sa mise en place.

Ainsi, le coût de l'option A devrait être inférieur à celui de l'option B car elle requiert moins de points de mesure et, la plupart du temps, sur une période de suivi plus courte. De même, dans le cas où les projets d'amélioration des performances énergétiques sont de petite taille mais en grand nombre, les options A et B peuvent s'avérer plus coûteuses que l'option C qui ne nécessite le déploiement que d'un nombre réduit d'équipements de mesure, voire se limiter à faire des relevés sur des compteurs existants. Cependant, les évaluations des paramètres non mesurés doivent être réalisées à partir d'une base de connaissances constituée par le prestataire en amont du déploiement du protocole d'évaluation.

De la même manière, l'utilisation de l'option D peut s'avérer coûteuse car elle demande un travail préparatoire assez important. Le développement des bases et modèles de connaissance nécessaires aux évaluations et simulations demande un investissement important en amont de leur utilisation sur le terrain, car il mobilise du personnel qualifié et des études scientifiques approfondies pour valider les évaluations et les simulations qui seront réalisées par la suite. Les coûts de développement des outils d'évaluation ou de simulation représentent donc un investissement important en amont de la réalisation d'évaluation mais, comme tout investissement, peut être rentabilisé par la suite durant la phase d'exploitation de ces outils et de ces connaissances. Le recours à la simulation (option D) reste tout de même réservé à un personnel qualifié, tandis que l'usage d'outils d'évaluation élaboré à partir d'autres approches (en particulier, les options A et C) peut a priori être diffusé plus largement.

Enfin, nous pouvons remarquer que le coût des protocoles d'évaluation peut être mutualisé avec celui d'autres prestations. La disposition de compteurs supplémentaires pourra alimenter les prestations de conduite, maintenance et suivi des installations durant la durée du contrat. De même, certains équipements, et notamment les compteurs d'énergie, peuvent servir à l'indexation de factures énergétiques.

Équilibrage incertitude-coût

La maîtrise des coûts des protocoles d'évaluation pour les projets d'amélioration des performances énergétiques conduit les prestataires de services énergétiques à rechercher des équilibres entre précision et coût. En définitive, les moyens à mettre en œuvre peuvent être déterminés en examinant deux critères :

- **la valeur attendue des économies d'énergie** : plus cette valeur est importante, plus on sera disposé à déployer des moyens d'évaluation importants pour établir le montant des économies d'énergie générées par le projet d'amélioration des performances énergétiques.
- **la variation des consommations d'énergie** de l'installation sur un cycle de fonctionnement : si les consommations d'énergie de l'installation varient fortement dans

le temps, il sera nécessaire de mettre en place un protocole d'évaluation à même de suivre et de rendre compte de ses variations.

On peut retenir que *les protocoles d'évaluation des économies d'énergie peuvent représenter environ 10 % de la valeur des économies réalisées* lorsque la valeur des énergies générées est importante ou bien que les variations importantes de la charge de l'installation imposent de suivre l'installation sur plusieurs cycles de fonctionnement. Réciproquement, on peut considérer que la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation n'est pas pertinente si son coût attendu représente plus de 10 % des gains espérés sur la facture énergétique.

Enfin, nous reprenons à notre compte la procédure de sélection qui est présentée sur la figure 5.5, et qui reprend certains éléments exposés dans cette partie et en les traduisant en critères de sélection pour l'aide au choix d'une méthode d'évaluation des économies d'énergie générées par un projet d'amélioration.

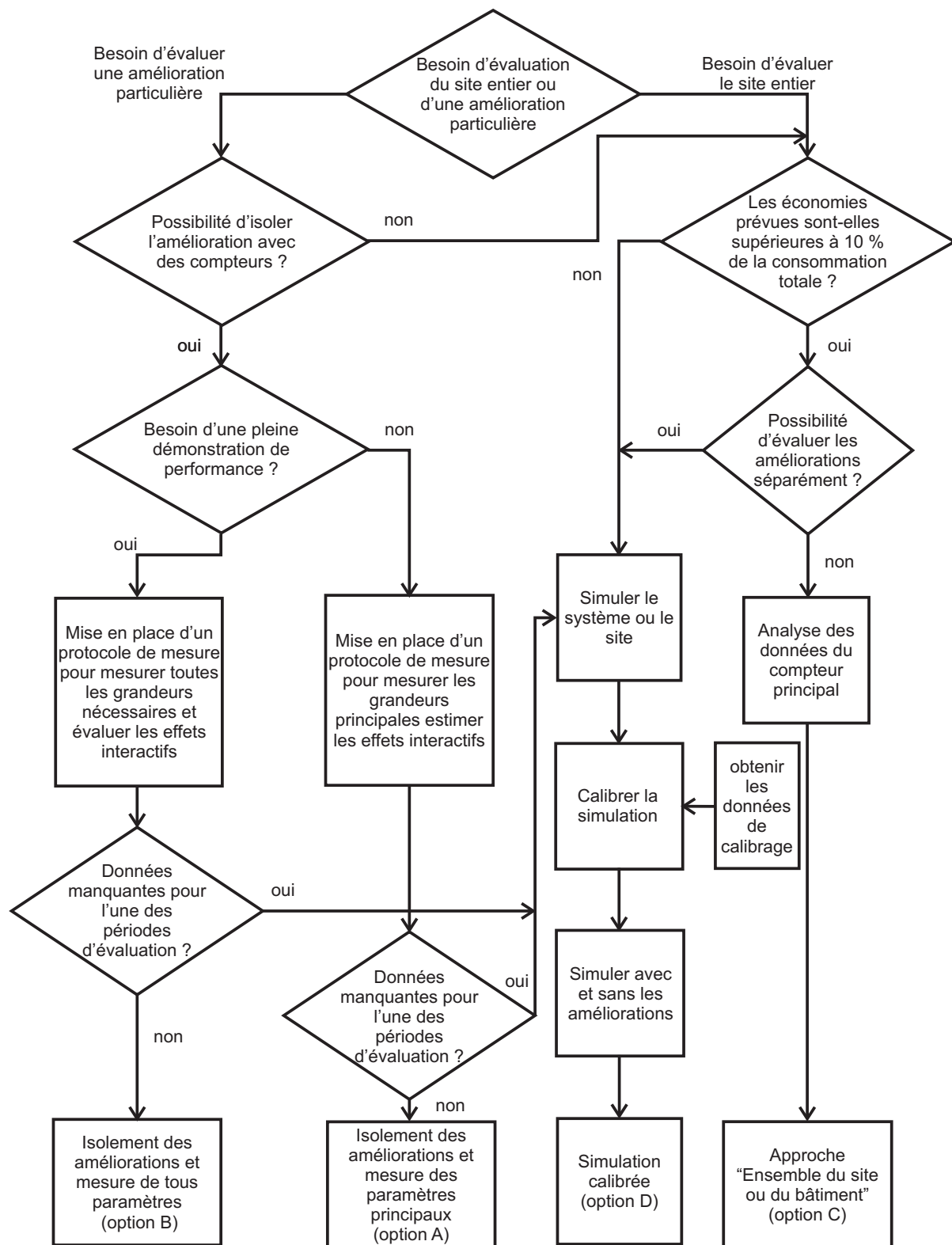


FIG. 5.5 – Procédure d’aide à la sélection des protocoles d’évaluation (d’après [IPMVP, 2007]).

Chapitre 6

Protocole de mesure des performances des installations de production d'eau glacée

6.1 Objet du protocole d'évaluation

6.1.1 La climatisation dans les immeubles de bureaux

En 2004, en France, le parc de bâtiments du secteur tertiaire représente une surface chauffée de près de 850 millions de mètres-carrés [ADEME, 2006], dont un cinquième sont des immeubles de bureaux. La consommation d'énergie finale du secteur tertiaire en France s'établit à 214 *TWh*, celle des immeubles de bureaux à environ 58 *TWh*, ce qui représente plus du quart des consommations de l'ensemble des bâtiments tertiaires (figure 6.1).

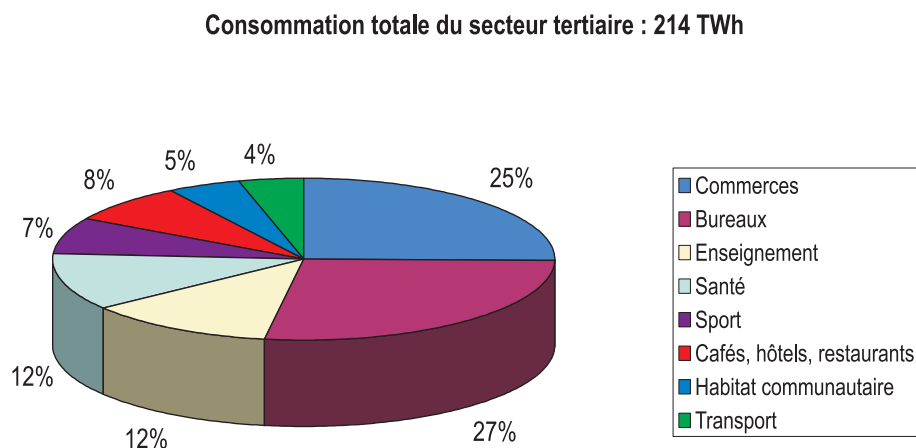


FIG. 6.1 – Répartition des consommations d'énergie finale des bâtiments du secteur tertiaire.

D'après le tableau 6.1, la consommation de la climatisation représente 8 % de la consommation d'énergie de l'ensemble des immeubles de bureaux (4,2 *TWh*). Dans le même temps, « seulement » un tiers des bâtiments tertiaires neufs construits en 2004

et un peu plus de la moitié du parc des immeubles de bureaux (55 %) est équipé d'une installation de climatisation. Ainsi, on peut légitimement supposer, en première approche, que le rafraîchissement représente environ 15 % de la consommation d'un immeuble de bureaux climatisé.

Branche	Consommation d'énergie finale en <i>TWh</i>					
	Chauffage	ECS	Cuisson	Électricité spécifique	Rafrâichissement	Total
Commerces	22,2	2,9	1,1	20,5	2,9	49,7
Bureaux	28,5	1,4	0,8	16,3	4,2	51,2
Enseignement	19,9	2,4	1,6	2,3	0,3	26,6
Santé, action sociale	14,9	3,7	1,2	5,3	1,0	26,6
Sport	9,1	3,8	0,4	2,9	0,8	17
Cafés, hôtels, restaurants	9,8	2,6	5,9	3,3	0,9	22,6
Habitat communautaire	7,0	2,1	1,3	1,9	0,1	12,3
Transports	4,0	0,5	0,2	3,8	0,1	8,7
Total	115,4	19,4	12,7	56,3	10,3	214,1

TAB. 6.1 – Consommation d'énergie finale par usages des bâtiments du secteur tertiaire en 2001 ([ADEME, 2005]).

En réalité, cette valeur de 15% masque une grande disparité selon le type de bâtiment, qui a été révélée par des campagnes de mesures sur des bâtiments de bureaux. A l'issue d'une campagne de mesures sur des immeubles de bureaux situés en région Provence Alpes Côte d'Azur, [Enertech, 2002] nous indique que la climatisation peut représenter entre 6 et 17 % de la consommation totale. De même, des mesures réalisées en région Rhône-Alpes ([GreenEffect, 2005]) situent cette part de consommation entre 0 et 30 %, tandis que les résultats d'un benchmarking du parc d'immeubles de bureaux en Grande Bretagne situent la consommation d'énergie entre 0 et 25 % de la consommation d'énergie totale ([GEEBP, 2000]).

Enfin, [ADEME, 2005] propose une répartition moyenne par poste de consommation, estimée sur la base du parc français d'immeubles de bureaux, dont la consommation moyenne en énergie finale est d'environ 280 kWh/m^2 :

- éclairage : 40 kWh/m^2 , soit 14,3 % de la consommation totale ;
- chauffage : 135 kWh/m^2 , soit 48,2 % de la consommation totale ;
- rafraîchissement : 45 kWh/m^2 , soit 16,1 % de la consommation totale ;
- usages spécifiques électriques : 25 kWh/m^2 , soit 8,9 % de la consommation totale ;
- auxiliaires : 35 kWh/m^2 , soit 12,5 % de la consommation totale.

On pourra donc retenir que la climatisation représente en moyenne 15 % de la consommation d'énergie d'un immeuble de bureaux climatisés en France, mais qu'elle peut représenter jusqu'au double en fonction du type de bâtiment.

De nombreuses technologies permettent d'assurer la climatisation des immeubles de bureaux. L'énergie frigorifique est produite à l'aide de machines thermodynamiques parmi lesquelles on distingue les machines à absorption et les machines à compression de vapeur de fluide frigorigène. Comme indiqué dans le paragraphe 1.3, les machines à absorption représentent moins de 1% du parc de machines frigorifiques installées. Nous excluons donc naturellement ce type de machines de nos propos, et *ne prenons donc en considération que les machines frigorifiques à compression de vapeur*.

Nous allons maintenant établir dans ce chapitre les éléments techniques d'un protocole d'évaluation des économies d'énergie générées par des projets d'amélioration sur des installations de production d'eau glacée pour la climatisation d'immeubles de bureaux. Nous reprenons donc la trame décrite dans le chapitre précédent (figure 5.5) pour sélectionner le type d'approche d'évaluation que nous allons suivre. Dans le cadre de la rédaction de ce document, nous explorons les différentes méthodes d'évaluation adaptées à l'évaluation des projets d'amélioration des installations de production d'eau glacée pour la climatisation des immeubles de bureaux.

6.1.2 Les installations de production d'eau glacée pour la climatisation des bâtiments

Traditionnellement, les installations de climatisation peuvent être classées en quatre catégories selon le moyen employé pour distribuer l'énergie frigorifique depuis son lieu de production au lieu d'usage. Dans le tableau 6.2, on distingue ainsi les installations selon que la distribution de l'énergie frigorifique est réalisée par l'intermédiaire d'un réseau d'eau, d'un réseau d'air ou d'un réseau de fluide frigorigène (systèmes dit « à détente directe »). Une dernière catégorie correspond à une solution intermédiaire de deux catégories parmi les trois que nous venons de présenter : il s'agit des systèmes « mixtes » dans lesquels l'énergie frigorifique est distribuée à la fois par un réseau d'air et par un réseau d'eau.

Le tableau 6.2 fait apparaître la distinction entre les systèmes à détente directe et les installations alimentées par un groupe de production d'eau glacée. Dans les installations à détente directe, l'évaporateur du groupe frigorifique refroidit directement l'air à traiter (cf. figure 6.2). L'évaporateur peut se situer directement dans le local à traiter comme dans le cas des armoires de climatisation et des installations multi-blocs, mais il peut également se situer dans une gaine de ventilation. Dans ce dernier cas, l'évaporateur refroidit l'air avant que celui-ci ne soit distribué par l'intermédiaire d'un réseau de gaines de ventilation.

Désignation des catégories	Équipement de production de l'énergie frigorifique	Moyen de distribution de l'énergie frigorifique
Systèmes « tout eau »	Groupes de production d'eau glacée	Boucle d'eau glacée alimentant des batteries froides dans les unités terminales
Systèmes « tout air »	Groupes de production d'eau glacée	Boucle d'air traité en centrale de traitement d'air alimentée en eau froide par une boucle d'eau glacée locale
Systèmes « mixtes »	Groupes de production d'eau glacée	Boucle d'air prétraité en centrale de traitement d'air alimentée en eau froide par une boucle d'eau glacée locale et boucle d'eau glacée alimentant des batteries froides dans les unités terminales pour traitement final de l'air
Systèmes à détente directe	Multi-blocs Armoires de climatisation	Circuit de fluide frigorigène avec détente dans le local à climatiser
	Unité de toiture	Circuit de fluide frigorigène avec détente dans une centrale de traitement d'air puis distribution de l'air traité par gaine de ventilation

TAB. 6.2 – Typologie des installations de climatisation pour immeubles de bureaux.

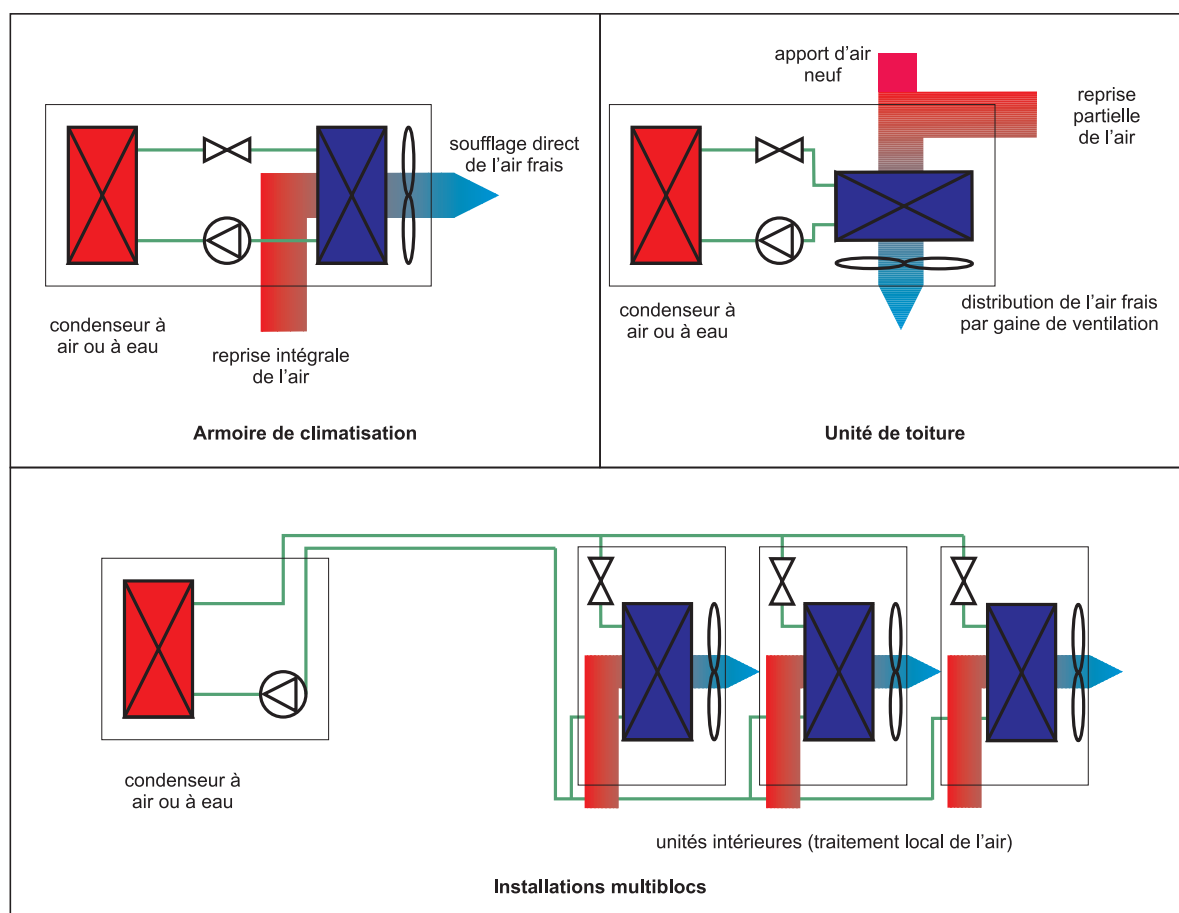


FIG. 6.2 – Représentation schématique des systèmes de climatisation à détente directe (d'après [Dupont, 2006]).

Dans les installations alimentées par un groupe de production d'eau glacée, l'air n'est pas refroidi directement par l'évaporateur du groupe mais par une batterie froide alimentée en eau glacée (cf. figures 6.3, 6.4 et 6.5). Le réseau de distribution d'eau glacée peut être de dimension modeste dans le cas où la batterie froide refroidit l'air à l'intérieur d'une centrale de traitement d'air (systèmes « tout air » représentés sur la figure 6.3). Dans ce cas, l'air refroidi est ensuite distribué par l'intermédiaire d'un réseau de gaines de ventilation.

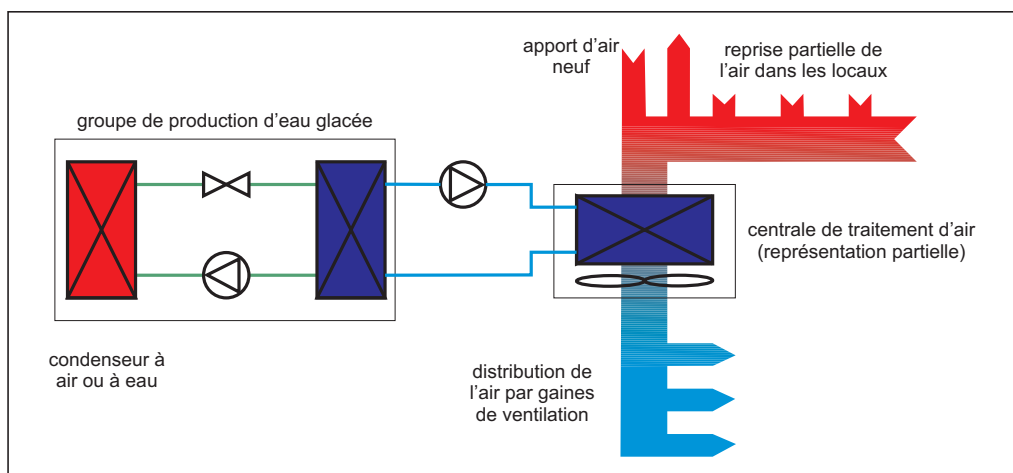


FIG. 6.3 – Représentation synoptique d'un système de climatisation « tout air » alimenté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).

Dans les systèmes « tout eau », les batteries froides sont situées dans des unités terminales qui refroidissent l'air localement (figure 6.4).

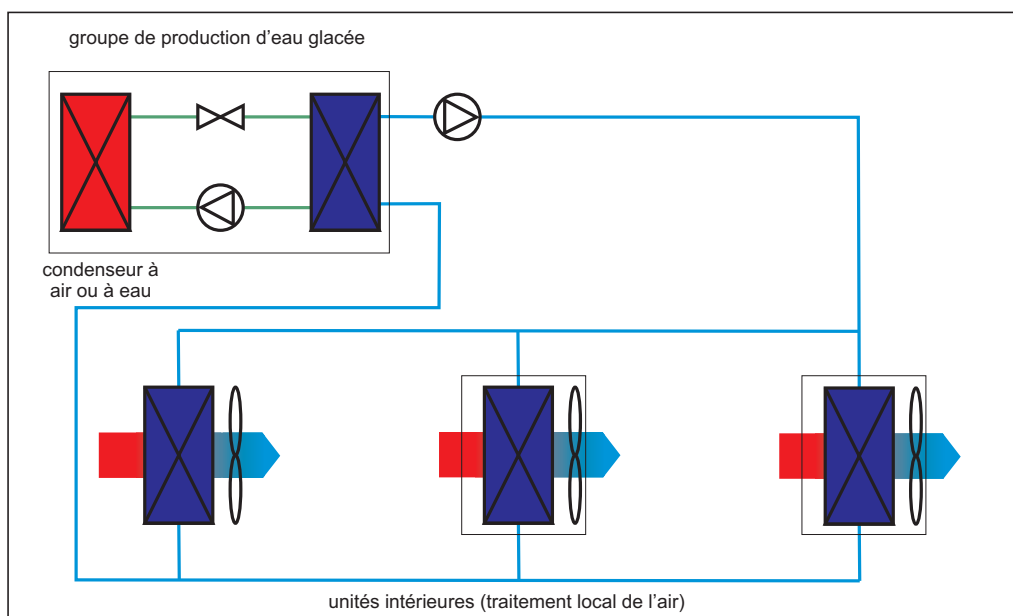


FIG. 6.4 – Représentation schématisée d'un système de climatisation « tout eau » alimenté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).

Enfin, il existe des installations « mixtes » dans lesquelles ces deux systèmes existent et fonctionnent simultanément (figure 6.5). L'air est d'abord traité une première fois dans une centrale de traitement d'air (prétraitement) avant d'être distribué via un réseau de gaines de ventilation. Puis, si cela est nécessaire, il est refroidi localement par des batteries froides d'unités terminales.

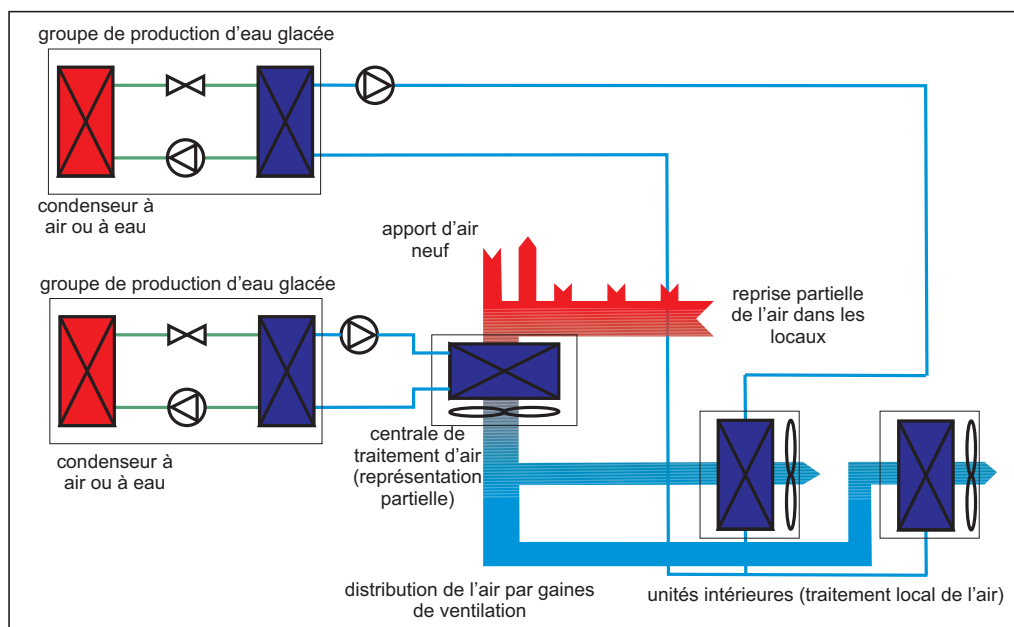


FIG. 6.5 – Représentation schématique d'un système de climatisation mixte alimenté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).

Notons par ailleurs, que les installations que nous avons décrites sont des installations de climatisation de l'air, mais que seules les installations dans lesquelles l'énergie frigorifique est distribuée par l'air, sont aptes à assurer dans le même temps la ventilation en air neuf des locaux. Les bâtiments dont la climatisation est assurée par une installation dans laquelle l'énergie frigorifique est distribuée par l'intermédiaire d'un réseau d'eau glacée ou de fluide frigorigène doivent comporter un réseau de ventilation parallèle permettant de renouveler l'air des locaux conformément à la réglementation en vigueur ([Arrêté 24 mai 2006]).

Enfin, comme nous l'avons suggéré sur les représentations schématiques des installations de climatisation, l'évacuation de la chaleur produite au condenseur des groupes frigorifiques peut être évacuée à l'aide de deux vecteurs : l'air ou l'eau. Si l'évacuation de la chaleur est assurée par le passage de l'air dans le condenseur, les ventilateurs chargés de forcer le passage de l'air sont directement intégrés au groupe frigorifique. En revanche, si cette évacuation doit être assurée par l'eau, il est indispensable de prévoir les équipements nécessaires au refroidissement de cette eau (cf. figure 6.6). L'installation est alors complétée par une boucle d'eau chaude, appelée « boucle de refroidissement ». L'eau de cette boucle est refroidie par des tours de refroidissement (« refroidissement humide ») ou par des aéroréfrigérants (« refroidissement sec »).

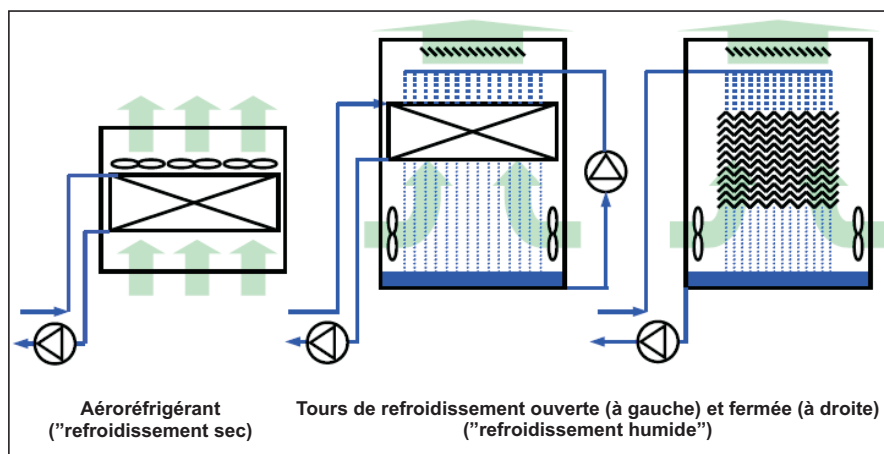


FIG. 6.6 – Représentation schématique des systèmes d'évacuation de la chaleur ([Dupont, 2006]).

[Dupont, 2006] a établi la répartition de ces systèmes sur l'ensemble du parc de bâtiments tertiaires pour les cinq plus grands pays de l'Union Européenne (Allemagne, Espagne, France, Italie, Royaume Uni). Cette répartition, présentée dans le tableau 6.3, nous indique que les systèmes de climatisation alimentés par des groupes de production d'eau glacée représentent près de 90 % du parc de bâtiments tertiaires climatisés de cinq pays étudiés. Ceci nous incite donc à orienter nos travaux en direction de la mise au point de protocoles d'évaluation des installations de production frigorifique centralisées constituées de groupes de production d'eau glacée et à écarter les installations de climatisation à détente directe.

Équipement de production frigorifique	Parc climatisé en 2000 (en 10^6 m^2)					Répartition (en % du total)
	Allemagne	Espagne	France	Italie	Royaume Uni	
Groupes de production d'eau glacée	80,80	165,89	111,85	64,52	220,53	89,6 %
Multi-blocs	4,52	2,06	1,33	0,65	0,85	1,6 %
Unités de toiture	7,98	37,81	4,74	0,26	2,94	8,9 %

TAB. 6.3 – Parc de bâtiments tertiaires climatisés en fonction du type d'équipement de production d'énergie frigorifique.

6.1.3 Définition du périmètre d'évaluation et choix de l'approche d'évaluation

Dans la suite de ce document, nous prenons donc en considération les installations de production d'eau glacée représentées schématiquement sur la figure 6.7.

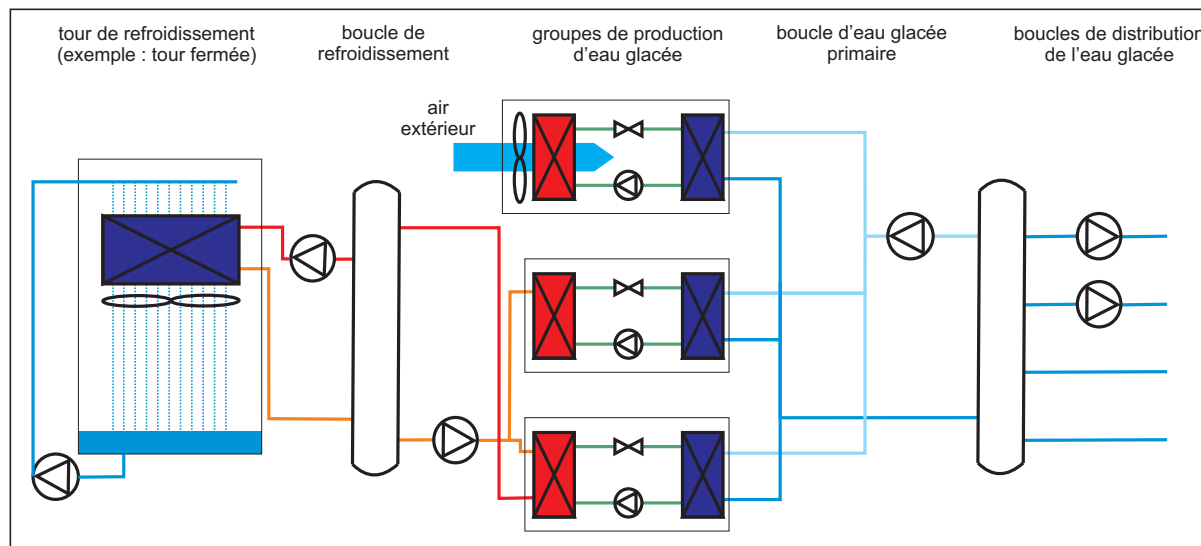


FIG. 6.7 – Représentation schématique des installations de production d'eau glacée.

Notons sur la figure 6.7 que ces installations comportent les systèmes suivants :

- un ou plusieurs groupes de production d'eau glacée alimentant une boucle « primaire » d'eau glacée ;
- une boucle de distribution d'eau glacée isolée hydrauliquement de la boucle primaire par une bouteille de découplage ;
- une boucle d'eau chaude pour le refroidissement des groupes de production d'eau glacée à condensation à eau (dans le cas de groupes de production d'eau glacée à condensation à eau) ;
- un ou plusieurs aéroréfrigérants ou tours de refroidissement pour évacuer la chaleur de la boucle de refroidissement.

On peut également noter sur cette figure 6.7 que pour des raisons techniques de circulation de l'eau, la boucle de refroidissement est isolée d'une boucle d'eau chaude primaire qui prélève directement la chaleur aux condenseurs des groupes de production d'eau glacée. Ceci nous permet donc d'isoler physiquement les équipements de production de l'eau glacée entre les bouteilles de découplage et les équipements auxiliaires pour la distribution de l'eau ou l'évacuation de la chaleur de part et d'autre de ces mêmes bouteilles de découplage.

L'expérience et les contacts que nous avons pu avoir avec les exploitants d'installations de production d'eau glacée nous ont appris que les projets d'améliorations les plus couramment réalisés sur ce type d'installation sont :

- le remplacement d'un groupe de production d'eau glacée vétuste par un groupe plus performant ;

-
- la modification des conditions de fonctionnement imposées par l’exploitant à chaque groupe (changement des températures d’évaporation et de condensation) ;
 - la modification du plan de fonctionnement de l’installation, en particulier à l’optimisation de la cascade des groupes de production d’eau glacée (durées de fonctionnement et ordre de démarrage).

Nous avons vu en début de chapitre que la consommation d’énergie des installations de climatisation représente environ 10 à 15 % de la consommation d’un bâtiment. Par ailleurs, les études sur les consommations d’électricité des systèmes de climatisation ([Enertech, 2002]) nous indique que pour les systèmes de climatisation à production d’eau glacée centralisée, près de 60 % des consommations d’énergie sont dues uniquement aux groupes de production d’eau glacée. Les autres consommations d’énergie se répartissent entre les auxiliaires de distribution d’eau glacée et, le cas échéant, les équipements d’évacuation de la chaleur produite au condenseur des groupes de production d’eau glacée (tours de refroidissement et aéroréfrigérants). Par suite, nous en déduisons donc que les consommations d’énergie des groupes de production d’eau glacée ne représentent pas plus de 10% des consommations totales d’un bâtiment.

Ainsi, les économies d’énergie que nous souhaitons évaluer sont nécessairement inférieures à 10 % de la consommation totale du bâtiment. Si cette consommation peut sembler insignifiante, il faut tout de même rappeler que ces modifications sont susceptibles d’être réalisées dans le cadre d’un contrat de performance énergétique portant sur les installations de production frigorifique. Or comme nous l’avons vu au chapitre 3, la contractualisation de la performance repose nécessairement sur un protocole d’évaluation. Ainsi, bien que ne représentant qu’une modeste part de la facture énergétique d’un immeuble de bureaux, le développement d’un protocole d’évaluation des performances énergétiques des installations de production frigorifique est indispensable.

De plus, si la climatisation représente 15% de la consommation totale d’un bâtiment, il faut bien se rendre compte que son poids est double si l’on ne s’intéresse qu’à la facture d’électricité d’un bâtiment qui utiliserait du gaz comme énergie de chauffage.

Afin de sélectionner l’approche adaptée au système que nous souhaitons évaluer, nous reprenons l’analyse comparative des différentes approches ou options que nous avons décrites dans le chapitre précédent. *Étant donné que nous estimons que l’impact, que nous cherchons à évaluer, est inférieur à 10 % de la consommation totale du bâtiment, la procédure d’aide à la sélection des protocoles d’évaluation présentée sur la figure 5.5 nous conduit à privilégier naturellement une approche « isolement des modifications ».*

Cependant, dans le cas des installations comportant plusieurs groupes de production d’eau glacée, les groupes fonctionnent de manière cohérente les uns avec les autres de manière à fournir l’énergie frigorifique nécessaire à la climatisation du bâtiment concerné. Le fonctionnement de ces groupes est établi dans un plan de fonctionnement. C’est notamment ce plan qui détermine les mises en marche successives des groupes de production d’eau glacée, de manière à répondre à la demande d’énergie frigorifique. Cette cascade de groupes forme donc un ensemble d’équipements cohérent.

donc mettre en œuvre les procédures nécessaires pour l'évaluation de ces effets interactifs.

6.2 Grandeurs caractéristiques des systèmes évalués

6.2.1 Groupes de production d'eau glacée

La caractérisation des performances des groupes de production d'eau glacée est décrite par la norme [NF 14511], relative aux climatiseurs, pompes à chaleur et groupes de production d'eau glacée avec compresseur entraîné par un moteur électrique. La performance de ces machines frigorifiques est déterminée par l'efficacité frigorifique, notée EER (en $[kW/kW]$) et définie comme le rapport de la puissance frigorifique totale P_f (en $[kW]$) fournie avec la puissance électrique absorbée P_a (en $[kW]$) par l'ensemble de la machine :

$$EER = \frac{P_f}{P_a} \quad (6.1)$$

Si la puissance électrique est déterminée par une simple mesure (cf. paragraphe 6.3), la puissance frigorifique sera déterminée à l'aide du débit massique de l'eau côté évaporateur $\dot{m}_{e\ evap}$ (en $[kg/s]$) et de la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur.

Cette norme décrit également les grandeurs à mesurer ou à imposer à une machine frigorifique sur le périmètre d'évaluation que nous avons défini au paragraphe précédent (figures 6.9 et 6.10) dans le cadre d'une évaluation des performances nominales des machines frigorifiques :

- la puissance électrique absorbée par le groupe frigorifique, P_a $[kW]$
- la température de l'eau glacée en entrée de l'évaporateur, $T_{e\ ee}$ $[^{\circ}C]$
- la température de l'eau glacée en sortie de l'évaporateur, $T_{e\ se}$ $[^{\circ}C]$
- le débit massique d'eau côté évaporateur, $\dot{m}_{e\ evap}$ $[kg/s]$

puis, s'il s'agit d'un condenseur à eau, de :

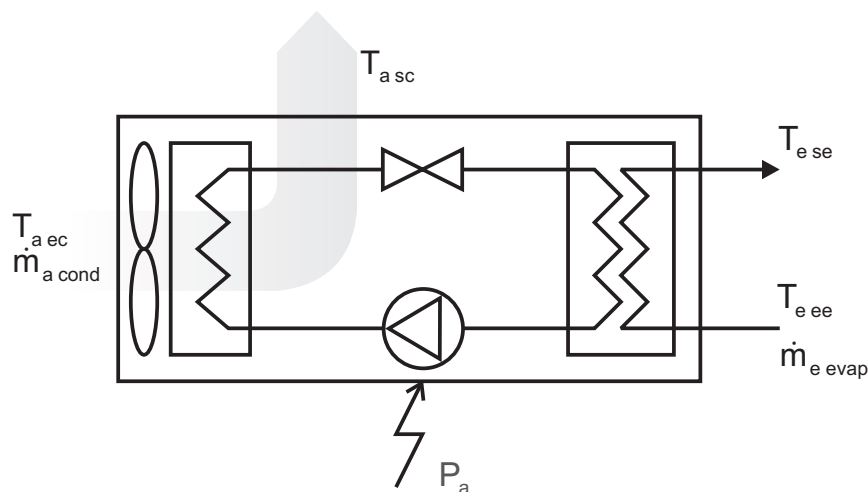
- la température de l'eau en entrée du condenseur, $T_{e\ ec}$ $[^{\circ}C]$
- la température de l'eau en sortie du condenseur, $T_{e\ sc}$ $[^{\circ}C]$
- le débit massique d'eau côté condenseur, $\dot{m}_{e\ cond}$ $[kg/s]$

ou, s'il s'agit d'un condenseur à air, de :

- le débit massique d'air côté condenseur, $\dot{m}_{a\ cond}$ $[kg/s]$
- la température de l'air en entrée du condenseur, $T_{a\ ec}$ $[^{\circ}C]$
- la température de l'air en sortie du condenseur, $T_{a\ sc}$ $[^{\circ}C]$

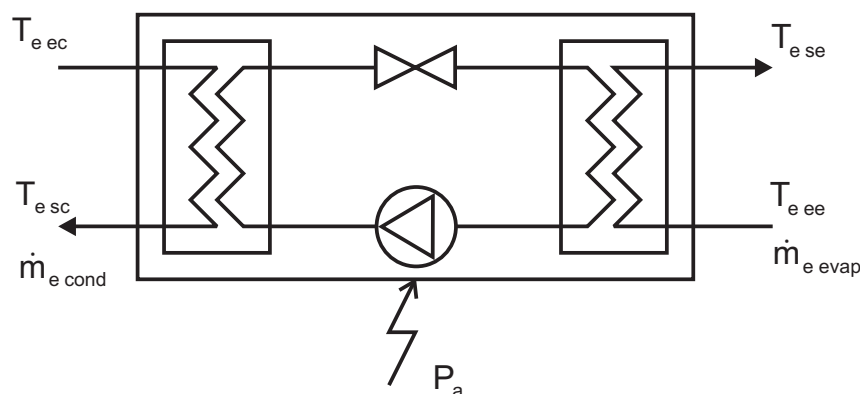
Nous précisons que la puissance électrique absorbée par un groupe de production d'eau glacée est composée des puissances électriques absorbées par (cf. [NF 14511]) :

- le ou les compresseur(s) du groupe ;
- les dispositifs de commande et de sécurité de l'appareil ;
- les auxiliaires (pompes et ventilateurs) assurant la circulation des fluides caloporteurs au condenseur et à l'évaporateur (s'ils font partie intégrante du groupe).



Groupe de production d'eau glacée à condensation à air

FIG. 6.9 – Grandeurs pour l'évaluation des performances des groupes de production d'eau glacée à condensation à air [NF 14511].



Groupe de production d'eau glacée à condensation à eau

FIG. 6.10 – Grandeurs pour l'évaluation des performances des groupes de production d'eau glacée à condensation à eau [NF 14511].

Remarques :

- la puissance calorifique produite par un groupe de production d'eau glacée n'est mesurée pour la certification des performances énergétiques du groupe que dans le cas où il s'agit d'une puissance utile (récupération de chaleur).
- nous ne prenons ici en considération que les variables identifiées pour la certification des performances énergétiques des machines frigorifiques. Cette norme décrit également des méthodes de mesure d'autres caractéristiques de la machine comme les pertes de charges aux échangeurs ou sa puissance acoustique, qui n'ont pas de lien

direct avec les caractéristiques énergétiques que nous souhaitons déterminer dans ce document.

Par ailleurs, l'expérience montre que, sur site, les groupes de production d'eau glacée fonctionnent à débit d'eau constant côté condenseur et évaporateur. D'après [NF 14511], sont considérées constantes des valeurs qui ne varient pas de plus de 5 % autour d'une valeur moyenne. Tous les groupes que nous avons mesurés (cf. chapitre 7) fonctionnaient à débit d'eau constant côté condenseur et seuls deux d'entre eux fonctionnaient avec un débit d'eau variable côté évaporateur. Cependant, la variation de ces débits n'excédait pas 10 % par rapport au débit moyen.

Dans le cadre d'essais normalisés pour la certification des performances des groupes frigorifiques, les mesures sont réalisées en imposant les débits d'eau. Cela permet principalement de donner aux bureaux d'études les informations nécessaires au dimensionnement des installations et de préciser les conditions de fonctionnement nominales dans lesquelles les performances sont mesurées. Nous verrons dans le chapitre 7 que la mesure d'un point de fonctionnement sur site suffit à prendre en compte la différence éventuelle entre les débits utilisés pour la certification des performances nominales du groupe et les débits réels sur site. Une fois ce point de fonctionnement connu, comme les débits restent constants durant la phase d'exploitation, ils ne représentent plus des variables à prendre à considération pour ajuster les consommations d'énergie d'une période d'évaluation à une autre. Nous avons donc décidé d'exclure la mesure du débit d'eau ou d'air, au condenseur de notre protocole de mesure. Côté évaporateur, la mesure du débit d'eau reste indispensable à la détermination de la puissance frigorifique produite.

Enfin, les variables restantes ne sont pas indépendantes entre elles. Le bilan thermique classique sur l'évaporateur nous donne la relation entre la puissance frigorifique, la différence de température de l'eau en entrée et en sortie et le débit d'eau dans l'évaporateur :

$$P_f = \dot{m}_{e\ evap} \cdot C_{pe} \cdot (T_{e\ ee} - T_{e\ se}) \quad (6.2)$$

De la même manière, un bilan thermique côté condenseur nous donne une relation symétrique sur la puissance calorifique évacuée P_c :

$$P_c = \dot{m}_{e\ cond} \cdot C_{pe} \cdot (T_{e\ sc} - T_{e\ ec}) \quad (6.3)$$

ou, s'il s'agit d'un condenseur à air :

$$P_c = \dot{m}_{a\ cond} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a\ sc} - T_{a\ ec}) \quad (6.4)$$

De plus, le bilan thermodynamique du cycle frigorifique donne :

$$P_c = P_{ac} + P_f \quad (6.5)$$

où P_{ac} est la puissance absorbée par le compresseur.

soit (dans le cas d'un condenseur à eau) :

$$P_{ac} + \dot{m}_{e\ evap} \cdot C_{pe} \cdot (T_{e\ ee} - T_{e\ se}) = \dot{m}_{a\ cond} \cdot C_{pa} \cdot (T_{a\ sc} - T_{a\ ec}) \quad (6.6)$$

Lors de la réalisation de mesures sur un groupe production d'eau glacée, il est assez difficile d'accéder à la mesure directe de la puissance électrique absorbée que le seul compresseur que ce soit dans le cadre de la certification des performances ou davantage encore,

dans le cadre de mesures sur site. La machine ne dispose que d'une seule alimentation pour l'ensemble de ses fonctions, et parvenir à isoler l'alimentation du compresseur suppose des opérations qui compromettent la validité de la certification des performances (la machine frigorifique est mesurée comme constituant un seul équipement). Nous formulons donc l'hypothèse que la puissance électrique absorbée par le compresseur est une fraction constante de la puissance électrique absorbée par le groupe frigorifique. De plus, les documents constructeurs nous indiquent que la puissance des auxiliaires n'est qu'une faible fraction de la puissance totale, ce qui minimise l'erreur introduite par notre hypothèse.

Sous ces hypothèses, l'équation 6.6 nous donne donc un lien de dépendance entre les variables ce qui nous permet de supprimer une variable. Notre choix est guidé par des considérations pratiques : par exemple, la mesure de la température de sortie d'un condenseur à air étant complexe, nous décidons d'écarter cette variable.

Au final, en considérant les liens de dépendance entre les grandeurs variables et les grandeurs invariantes sur les machines en fonctionnement sur site, nous évaluons la performance énergétique d'un groupe de production d'eau glacée par la mesure de cinq variables listées dans le tableau 6.4.

Grandeurs à mesurer	Symbole	Unité
Puissance électrique absorbée par le groupe frigorifique	P_{ac}	kW
Température de l'eau en entrée de l'évaporateur	$T_{e\ ee}$	$^{\circ}C$
Température de l'eau en sortie de l'évaporateur	$T_{e\ se}$	$^{\circ}C$
Débit massique d'eau dans l'évaporateur	$\dot{m}_{e\ evap}$	kg/s
Température de l'eau (resp. de l'air) en entrée du condenseur	$T_{e\ ec}$ (resp. $T_{a\ ec}$)	$^{\circ}C$

TAB. 6.4 – Grandeurs à mesurer pour la caractérisation des performances d'un groupe de production d'eau glacée.

6.2.2 Effets interactifs

Identification des effets interactifs

Dans le cadre du protocole d'évaluation que nous mettons en place, les effets interactifs concernent les effets de la modification d'un groupe de production d'eau glacée sur la boucle de refroidissement (cf. tableau 5.2.2).

Cette boucle de refroidissement est équipée de tours de refroidissement et d'aéroréfrigérants dont le fonctionnement est également régi par un plan de fonctionnement qui décrit l'ordre et les conditions de leur mise en marche. On peut également parler de cascade de tours de refroidissement et d'aéroréfrigérants. Si la cascade des groupes frigorifiques est établie de manière à fournir l'eau glacée à la température souhaitée pour une puis-

sance frigorifique demandée, la cascade des équipements de la boucle de refroidissement est établie de manière à assurer le refroidissement de l'eau à une température donnée. Les ventilateurs des tours de refroidissement sont donc mis en marche les uns après les autres, tour après tour, jusqu'à atteindre cette température de consigne (cf. [ConsoClim, 2002]). Dans le cas, où cette température de consigne n'est pas atteinte, la température de retour sur la boucle de refroidissement se stabilise néanmoins à une température supérieure, fonction de la capacité de refroidissement de l'ensemble des tours.

Enfin, nous pouvons noter que les tours de refroidissement humides ouvertes représentent près de 80% du parc de refroidisseurs d'eau installés en Europe ([Rivière, 2004]). Nous nous sommes donc naturellement concentrés sur la détermination des performances de cette catégorie de tour de refroidissement. Cependant, la méthode que nous utilisons pour déterminer les relations explicatives est tout à fait reproductibles aux autres types de refroidisseurs d'eau.

Grandeurs caractéristiques des performances des tours de refroidissement ouvertes

Les essais normalisés à mettre en œuvre pour caractériser les performances thermiques des tours de refroidissement humide ouvertes sont décrites dans [NF 14705]. Ces essais sont destinés à mesurer la capacité de refroidissement maximale des tours, qui est atteinte lorsque tous les ventilateurs fonctionnent à plein régime, c'est-à-dire lorsque le débit d'air qui traverse la tour est maximal.

Ce document établit les grandeurs physiques qui doivent être déterminées dans ce but :

- la puissance électrique absorbée, P_{at} en $[kW]$;
- la température de l'eau en entrée de la tour, $T_{e\ et}$ en $[^{\circ}C]$;
- la température humide de l'air, T_{ha} , $[^{\circ}C]$;
- la température de l'eau en sortie de la tour, $T_{s\ st}$ en $[^{\circ}C]$;
- le débit d'eau dans la tour, $\dot{m}_{e\ et}$, $[kg/s]$.

Nous précisons également que la puissance électrique absorbée par la tour correspond à la somme des puissances électriques absorbées par les ventilateurs.

6.2.3 Besoins d'énergie frigorifique

Afin d'ajuster les consommations d'énergie des groupes de production d'eau glacée avant et après amélioration, nous devons déterminer la demande énergétique sur chacune des périodes d'évaluation. De même, la détermination de la température humide de l'air (ou de la température sèche) est indispensable à l'ajustement des consommations des tours de refroidissement.

Dans un premier temps, nous avons choisi une démarche de mesure systématique. La détermination de la demande énergétique et la température de l'air peut simplement être réalisée par la mesure sur chacune des périodes d'évaluation avant et après amélioration des variables caractéristiques de cette demande et de la température d'air sur toute la période de référence et de suivi.

Comme nous l'avons vu précédemment, il s'agit donc de mesurer sur les deux périodes d'évaluation :

- la puissance frigorifique appelée par le réseau de distribution ;
- la température en sortie de l'évaporateur des groupes de production d'eau glacée ;
- la température sèche de l'air si les groupes de production d'eau glacée sont à condensation à air ;
- la température humide de l'air si la boucle de refroidissement est équipée de tours humides.

Cette mesure peut être réalisée avec le même type de matériel que nous décrivons dans le paragraphe suivant 6.3. Cependant, les installations de production d'eau glacée sous contrat d'exploitation sont souvent prises en charge dans le cadre d'un contrat de type « Marché Comptage » (cf. chapitre 1.3). Ces installations sont donc équipées du matériel permettant de mesurer la consommation d'énergie frigorifique consommée par le bâtiment sur une période dite « de relève ». Il est possible de modifier le paramétrage de ces compteurs pour réaliser des mesures sur des périodes plus courtes que les périodes de relève contractuelles, et de télérelever les index de consommation heure par heure. En revanche, sans télérelèvement ou sans système d'enregistrement automatique des index de consommation adapté au compteur, il est indispensable de disposer un autre appareil de mesure et d'enregistrement des données.

Dans ces cas-là, il est envisageable d'utiliser les compteurs d'énergie frigorifiques existants au lieu de devoir en disposer de nouveaux. Cela suppose toutefois que les parties du contrat d'exploitation parviennent à s'accorder sur le détournement de cet appareil de mesure pour les besoins du protocole de mesure. En effet, cet appareil de mesure est, à l'origine, le déterminant objectif de la rémunération du contrat d'exploitation et fait, à ce titre, l'objet de toutes les attentions des parties liées par contrat. Il n'est donc pas évident que le reparamétrage de cet appareil soit accepté facilement.

6.3 Protocole de mesure

6.3.1 Critères d'exactitude requis

D'après l'analyse menée au paragraphe précédent, le protocole de mesure à déployer sur les installations de production d'énergie frigorifique en vue de la caractérisation de sa performance, doit mesurer *simultanément* :

- pour les groupes frigorifiques : une puissance électrique, deux débits massiques et trois températures ;
- pour les tours de refroidissement humides : une puissance électrique, un débit massique et trois températures (dont une température d'air humide) ;
- pour la demande énergétique : un débit massique et deux températures.

Les procédures d'essais décrites dans [NF 14511] et [NF 14705] ne sont réalisables qu'à l'aide de bancs d'essai instrumentés, lesquels permettent à l'évaluateur de mesurer toutes les grandeurs recherchées mais également de contrôler certaines conditions d'essais des équipements.

En revanche, dans le cadre de la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation, les mesures ne peuvent être réalisées que sur des installations en exploitation. Les conditions de fonctionnement de l'installation sont donc conditionnées aux besoins du propriétaire, ou le cas échéant, aux engagements contractuels de l'exploitant. Le protocole que nous allons décrire doit donc être réalisé sous cette contrainte d'exploitation : nous ne pouvons orienter que modestement les conditions de fonctionnement de l'installation de manière à satisfaire aux besoins des mesures.

Par ailleurs, l'expérience montre que les installations en exploitation ne sont pas (ou dans de rares cas) équipées des appareils de mesure adéquats pour l'évaluation de leur performance. Bien souvent, on peut trouver des instruments de contrôle, comme des thermomètres à liquide organique ou à mercure insérés dans les conduites d'eau (montés sur doigt de gant), qui servent principalement à vérifier que les grandeurs évoluent bien dans le domaine de variation attendu par l'exploitant. De plus, ces appareils permettent de lire la mesure de la grandeur mais pas de l'enregistrer. Il est donc bien souvent inévitable de devoir disposer des nouveaux appareils permettant l'enregistrement des mesures.

Enfin, les annexes techniques de [ASHRAE, 2002] précise l'exactitude des instruments requise pour réaliser ces mesures (tableau 6.5). Dans les cas où les sites sont déjà équipés d'appareils de mesure et d'un système permettant l'enregistrement de celles-ci, comme un système de gestion centralisée, on prendra soin de vérifier que l'exactitude des appareils en place répond à ces critères d'exactitude requis pour l'évaluation des performances.

Grandeurs à mesurer	Appareils requis	Exactitude requise
Puissance électrique	Wattmètre	$\pm 2\%$
Température	Thermomètre	$\pm 2\%$
Débit massique	Débitmètre	$\pm 5\%$

TAB. 6.5 – Précision des instruments de mesure requise pour la caractérisation des performances d'un groupe de production d'eau glacée ([ASHRAE, 2002]).

Les appareils de mesure mis en œuvre doivent donc satisfaire à ces critères d'exactitude, mais également aux contraintes d'exploitation que nous avons décrites. Un grand nombre d'appareils de mesure nécessite d'être inséré dans l'installation de manière à ce que leur sonde soit en contact direct avec la grandeur mesurée. Pour les insérer, il faut donc stopper l'exploitation de l'installation, vidanger les réseaux dans lesquels on souhaite insérer un appareil de mesure, ôter le calorifugeage des conduites d'eau glacée avant d'éventuellement découper une canalisation pour pouvoir installer la partie de l'appareil de mesure. Une fois cette appareil installé, il faut alors procéder aux opérations inverses (calorifugeage, mise en eau du réseau et redémarrage de l'installation). Ces opérations représentent donc un coût important.

De plus, en fonction des disponibilités des machines ou des agents d'exploitation, il n'est pas toujours possible de procéder à l'arrêt de l'installation nécessaire à la réalisation de ces opérations dans le cadre de l'exploitation normale des installations. Enfin, certains sites, y compris certains bureaux, ont besoin d'une production d'eau glacée qua-

siment tout au long de l'année (locaux contenant des serveurs informatiques par exemple).

C'est pour ces raisons que nous introduisons un critère prépondérant dans notre procédure de sélection des appareils de mesure : *ces appareils de mesure doivent être amovibles et portables*.

6.3.2 Mesure de la puissance électrique

Les groupes de production d'eau glacée et une grande partie des tours de refroidissement sont alimentés par un courant triphasé de tension efficace de 400 V. La mesure de la puissance électrique absorbée par un groupe frigorifique nécessite donc un Wattmètre capable de réaliser des mesures sur ce type de courant.

De plus, la puissance électrique efficace absorbée par le groupe de production d'eau glacée que nous cherchons à mesurer est une puissance active. Le Wattmètre doit être capable de mesurer les déphasages sur chaque phase et d'en déduire la puissance active à partir de la mesure de la puissance apparente appelée par le groupe.

Ce type de mesure peut être réalisé par un analyseur de courant. A l'aide de trois pinces ampèremétriques (pour la mesure du courant) et de trois fiches (pour la tension) branchées sur les trois phases (et éventuellement une quatrième sur la phase neutre, si elle existe), cet instrument permet de mesurer les grandeurs que nous cherchons à observer.

Pour des raisons de sécurité, chaque groupe de production d'eau glacée est alimenté séparément. Les fiches et les pinces ampèremétriques sont donc reliées directement sur le tableau électrique qui alimente le groupe de production d'eau glacée. Notons au passage que cette opération ne peut être réalisée que par un personnel habilité à réaliser ces opérations sur les armoires électriques sous tension (cf. [UTE C 18-510]) : comme nous l'avons indiqué auparavant, ce protocole de mesure est mis en œuvre sur des installations en exploitation, donc sous tension.

Enfin, nous précisons que ce type d'appareils de mesure a une grande exactitude (0,1% d'après [Evan, 2003]), ce qui permet de répondre aux critères d'exactitude présentés dans le tableau 6.5.

6.3.3 Mesure du débit

Il existe un grand nombre de débitmètres volumétriques ou massiques dont le principe de fonctionnement est basé sur autant de phénomènes physiques : débitmètre Venturi, de Pitot, à tuyère, à effet vortex, Doppler, ou Coriolis, à ultrasons, ou encore à convection thermique ([Sigonnez, 2006]). L'utilisation de la plupart de ces débitmètres nécessite l'insertion d'une partie de l'appareil de mesure, dans le courant du fluide dont on cherche à évaluer le débit.

Pour toutes ces raisons, notre choix s'oriente vers les débitmètres permettant de réaliser des mesures non intrusives. Ce critère réduit considérablement les possibilités de choix, puisqu'on ne trouve plus que deux types de débitmètres dont le principe de fonctionnement

repose sur la mesure de la vitesse du fluide à partir de la modification d'ondes ultrasonores par le fluide en mouvement :

- *les débitmètres à effet Doppler* : le principe de la mesure de ce type de débitmètre repose sur la variation de fréquence d'une onde incidente après réflexion sur une particule ou une bulle de gaz entraînée par le fluide en mouvement ;
- *les débitmètres à ultrasons* : le principe de la mesure de ce type de débitmètre repose sur la différence de marche d'une onde ultrasonore sur un aller-retour entre deux émetteurs-récepteurs.

Notons que ces deux débitmètres mesurent des vitesses débitantes (moyennes sur la section de la conduite), et donc donne une valeur de débit volumique après que l'utilisateur a précisé le diamètre de la conduite sur laquelle la mesure est effectuée. L'estimation de ce diamètre peut être à l'origine d'un biais dans la mesure dans la cas où la conduite est légèrement obstruée ou usée (à cause de la corrosion, par exemple).

Ces deux débitmètres doivent respecter certaines conditions d'utilisation. L'une de ces restrictions est liée à la présence de particules solides ou de bulles de gaz dans l'eau dont on cherche à connaître le débit. Pour les débitmètres à effet Doppler, cette présence est indispensable car elle permet la réflexion des ondes. En revanche, pour les débitmètres à ultrasons, la réflexion des ondes est à éviter car elle nuit à la qualité du signal que l'on mesure.

Considérant que les réseaux d'eau ne sont, a priori, pas censés contenir de telles particules, le choix du type de débitmètre se porte naturellement vers un débitmètre à ultrasons. L'exactitude typique d'un débitmètre à ultrason varie entre 0,3 et 5 % ([Sigonnez, 2006]), ce qui permet de satisfaire le critère d'exactitude préconisé (tableau 6.5).

Enfin, précisons que l'utilisation de ce type de débitmètre doit respecter certaines conditions d'utilisation. La principale de ces conditions est d'effectuer la mesure sur des écoulements stabilisés, ce qui nécessite de trouver des sections de conduite droites, et relativement éloignées des points singuliers du réseau (coudes, divergents, convergents, jonctions de conduite, pompes, etc.). La documentation technique de chaque instrument précise les distances d'éloignement à respecter entre les singularités en aval et en amont en fonction du type de singularité : pour donner un ordre de grandeur, on peut indiquer que cette distance varie entre 10 et 40 fois le diamètre de la conduite instrumentée. De même, il est recommandé d'éviter les emplacements en hauteur susceptibles de retenir des poches de gaz, et qui représentent donc des lieux impropres à l'utilisation des débitmètres à ultrasons.

Toutes ces contraintes font que l'utilisation d'un débitmètre à ultrasons requiert une certaine technicité. De plus, l'accès aux conduites d'eau glacée n'est pas acquis d'avance, car il est nécessaire d'ôter le calorifugeage autour des canalisations pour accéder à la conduite sur laquelle seront disposées les sondes de mesure. Or certains calorifugeages ne s'ôtent pas facilement, si bien que l'opération ne permet pas d'obtenir une surface de conduite suffisamment propre et lisse pour accueillir convenablement ces sondes.

6.3.4 Mesure de la température

Le protocole de mesure que nous mettons en place doit mesurer la température de deux grandeurs corps : l'eau et l'air. Nous devons donc choisir des sondes de températures adaptées à ces deux mesures. Les sondes de température d'eau se présentent sous deux formes :

- *les sondes de contact* : disposées à la surface des canalisations contenant l'eau dont on cherche à mesurer la température, elles mesurent la température de contact des canalisations. Ceci implique donc qu'il existe un biais entre la température mesurée et la température de l'eau due à la résistance thermique de la paroi de la canalisation.
- *les sondes à plongeur* : elles sont directement introduites au contact de l'eau dans les doigts de gant des canalisations prévus à cet effet.

Les sondes de contact doivent être disposées directement au contact de la conduite d'eau, ce qui suppose de pouvoir ôter le calorifugeage de la conduite. Comme nous venons de le voir pour les sondes du débitmètre, cette condition n'est pas toujours évidente à obtenir. De même, il est indispensable que l'état de surface des canalisations soit le plus régulier possible de manière à ce que la géométrie des sondes s'adapte parfaitement à la géométrie de la canalisation. Cet état de surface est à l'origine d'une source d'erreur dans la mesure de la température en raison de la résistance thermique de contact supplémentaire qu'il crée.

Une sonde de température de contact doit être en équilibre thermique avec la canalisation de manière à mesurer convenablement la température de surface de la canalisation. Cette condition est à l'origine d'une autre source d'erreur caractéristique de ce type de sonde : elles sont sensibles aux transferts de chaleur avec leur environnement. Il est donc nécessaire de limiter au mieux ces transferts en disposant, par exemple, un isolant sur les sondes une fois qu'elles ont été mises en place.

De plus, lorsque la température de l'eau que l'on cherche à mesurer varie, la mesure ne peut être réalisée qu'une fois que la conduite puis la sonde ont atteint l'équilibre thermique. Ceci confère à la mesure par sonde de contact une inertie importante.

En comparaison avec ces inconvénients et ces sources d'erreur possibles, les sondes à plongeur nous semblent plus adaptées. Elles présentent l'avantage que leur mise en œuvre est moins source d'erreur que celle des sondes de contact. Toutefois, elles ne peuvent être insérées que dans les doigts de gant des canalisations existants. Il est en effet invisable de perforer la canalisation pour disposer ces sondes. Outre le risque important de dégradation de la canalisation, l'étanchéité entre la sonde et la canalisation est loin d'être assurée aisément.

Précisons que les sondes à plongeur utilisées dans le cadre de ce protocole de mesure réalisé en partenariat avec Elyo Cylergie, sont des sondes PT100 d'une exactitude de $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui permet également d'atteindre le niveau d'exactitude requis (cf. tableau 6.5).

Enfin, dans le cas où le groupe de production d'eau glacée est à condensation à air, nous disposons en entrée de ce condenseur une sonde PT100, également adaptée à la

mesure de la température de l'air.

6.3.5 Évaluation de la capacité calorifique de l'eau glycolée

Dans les cas où le réseau d'eau glacée contient de l'eau glycolée, il est indispensable de mesurer la capacité calorifique du mélange glycol-eau afin d'évaluer la puissance frigorifique fournie par le groupe de production d'eau glacée. En effet, selon le mélange, la capacité calorifique d'un mélange eau-glycol peut être inférieure de 10 % à celle de l'eau. Cette indétermination de la capacité calorifique se retrouve donc sur l'estimation de la puissance fournie.

Pour évaluer cette capacité calorifique, nous prélevons un échantillon d'eau glycolée sur le circuit d'eau glacée. Nous déterminons la capacité calorifique de l'échantillon à l'aide d'un essai classique au calorimètre.

6.3.6 Conditions d'essais

Contrairement au technicien qui réalise les essais de performance selon les protocoles de mesures normalisés (cf. [NF 14705] et [NF 14511]), l'exploitant ne peut pas forcer le fonctionnement de la machine, soit à cause des objectifs contractuels d'exploitation, soit parce qu'il n'a pas la main sur toutes les commandes du groupe de production d'eau glacée. En effet, une fois que le groupe de production d'eau glacée a été installé et testé par l'équipementier, l'exploitant n'a pas nécessairement la main sur l'ensemble des paramètres de l'automate interne de la machine, ce qui l'empêche, par exemple, de forcer le fonctionnement du compresseur à un taux de charge spécifié. Pour observer le fonctionnement d'un groupe frigorifique à des taux de charge différents, l'exploitant ne peut qu'agir sur la température de régulation du groupe, c'est-à-dire la température de l'eau en sortie de l'évaporateur, tout en restant dans une plage de variations soutenable pour l'ensemble de l'installation.

Ainsi, le domaine de variation des conditions de fonctionnement d'une installation de production d'eau glacé varie d'un cas à l'autre. Cependant, sous nos latitudes, les besoins d'eau glacée pour la climatisation des locaux ainsi que les conditions de fonctionnement (environnement) ont une amplitude de variation qui nous permet raisonnablement de penser qu'une quinzaine de jours suffisent pour couvrir un domaine de variation suffisant pour la caractérisation des performances des groupes de production d'eau glacée. Ceci sera vérifié par notre expérience, lors de la mise en œuvre de ce protocole de mesure sur site (cf. paragraphe 7.2).

6.3.7 Enregistreurs et stockage des données

Les données mesurées par chacun des appareils de mesure doivent être enregistrées avant d'être récupérées pour analyse. Il est possible de raccorder les appareils de mesure sur un système de gestion centralisée, dans le cas où le site en est équipé. Cependant, il n'est pas toujours évident matériellement d'établir cette connexion, consistant à relier un équipement à une centrale d'acquisition installée à distance du point de mesure. De plus, la mesure en temps réel des grandeurs n'est pas nécessaire pour répondre aux besoins d'un

protocole d'évaluation.

Chaque appareil de mesure peut également être équipé d'un enregistreur autonome (« data logger »). Ces petits boîtiers ont une autonomie de deux à trois ans, et sont capables de stocker environ 100 000 points, ce qui correspond à une mesure toutes les cinq minutes pendant un an. De plus, il est possible de communiquer avec ces enregistreurs par l'intermédiaire du réseau GSM et de récupérer les données enregistrées à distance, ce qui évite les déplacements sur site.

Comme nous souhaitons mesurer les performances des équipements pour des conditions de fonctionnement données, *il est indispensable de synchroniser ces mesures*. Or la mise en place d'enregistreurs autonomes sur chaque équipement présente le risque de ne pas réaliser correctement cette synchronisation, d'autant que ces enregistreurs ne sont pas à l'abri d'une défaillance, notamment d'alimentation. *Il est donc indispensable de centraliser l'enregistrement des données mesurées sur un seul et unique enregistreur*. Cette centralisation présente également l'avantage d'autoriser la vérification simultanée du bon fonctionnement des appareils de mesure. En revanche, cela mobilise davantage de capacité de stockage, et par conséquent limite la durée sur laquelle les mesures peuvent être stockées avant intervention du technicien qui réalise la mesure.

Enfin, il reste à définir le pas de temps ainsi que le type de mesure que nous allons enregistrer. Nous pouvons être tentés d'enregistrer les mesures sur un intervalle de temps court (par exemple, un point par minute), mais cela ne s'avère pas nécessaire à cause de l'inertie des équipements (cf. paragraphe suivant). De plus, la capacité de stockage des enregistreurs est limitée, ce qui milite pour un espacement des enregistrements. Aussi, il semble que l'enregistrement de la mesure sur cinq minutes est suffisante pour atteindre l'objectif que nous recherchons, sachant que [NF 14511] considère que le fonctionnement stabilisé d'un groupe de production d'eau glacée, par exemple, est atteint lorsque les grandeurs mesurées ne varient pas plus de 1 à 2 % selon les grandeurs pendant une période minimale de 10 minutes (période de mise en température).

6.3.8 Traitement des données avant exploitation

Après enregistrement des données, celles-ci doivent être traitées avant leur exploitation en vue de la détermination de la relation explicative de la performance des groupes de production d'eau glacée. En effet, le fonctionnement d'une machine frigorifique en général, présente des modes de fonctionnement transitoires entre deux points de fonctionnement stabilisé [Rivière, 2004], qui sont dues à la mise en température et à l'inertie des échanges thermiques entre les différents composants de la machine thermodynamique et son environnement. Nous cherchons donc à mesurer les régimes stationnaires sur lesquels sont évalués la performance des groupes de production d'eau glacée. Les séries de mesures enregistrées sont donc filtrées en utilisant le critère de stabilité précisé dans [NF 14511].

La non-prise en compte des modes de fonctionnement transitoires dans l'évaluation des performances énergétiques est négligeable sur la consommation d'énergie. Par exemple, sur l'un des groupes dont nous avons mesuré les performances, ce traitement de données réduit le nombre de points de mesure de plus de 1 700 à 500 points. Ce groupe a

consommé 8681 *kWh* pendant la période où ont été réalisées ces mesures. Si la consommation d'énergie du groupe est calculée sur les points de fonctionnement stabilisés, en attribuant à chaque point le poids horaire correspondant à l'intervalle de temps qui le sépare du point de fonctionnement stabilisé suivant, sa consommation d'énergie est estimée à 8537 *kWh*, soit une différence de 1,7 %.

Enfin, nous considérons qu'un point de mesure est considéré comme un point de fonctionnement quand la puissance électrique absorbée et la puissance frigorifique produite sont non « nulles ». Étant donné qu'il est rarement possible de mesurer une valeur « nulle » pour une grandeur, notamment du côté de la puissance frigorifique, nous considérons qu'une puissance est « nulle » lorsque sa valeur est inférieure à 5 % de la puissance nominale. En raison de l'inertie des équipements, il arrive que nous mesurions une puissance frigorifique fournie alors que le groupe ne consomme pas d'énergie. A priori, le filtrage des données que nous venons de décrire permet de supprimer ces effets transitoires. Par ailleurs, nous supprimons les points de mesure de puissance frigorifique « nulle » car notre objectif est bien de caractériser les consommations des groupes de production d'eau glacée en fonctionnement et non de caractériser les consommations de veille, bien que cela présente un grand intérêt scientifique que nous n'abordons pas dans le cadre de ce document.

Chapitre 7

Évaluation des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée

7.1 Données expérimentales

Le protocole de mesure décrit au chapitre 6 a été mis en œuvre sur plusieurs groupes frigorifiques. Cette campagne de mesure a été réalisée en collaboration avec Elyo Cylergie dans le cadre d'une convention de recherche avec le Centre Énergétique et Procédés, et concerne la mesure du fonctionnement d'une dizaine de groupes de production d'eau glacée et de deux tours de refroidissement humides exploités par Elyo. ***Conformément aux clauses de confidentialité de cette convention, les données expérimentales ainsi que certains résultats quantitatifs restent la propriété exclusive d'Elyo Cylergie. Nous ne pouvons donc pas publier ces données et la totalité des résultats obtenus dans le cadre de cette convention de recherche,*** notamment les résultats issus de ces données expérimentales concernant les modèles paramétriques qui font l'objet des paragraphes 7.2.2 et 7.3.2.

Les principales caractéristiques des groupes instrumentés sont données dans le tableau 7.1.

Désignation	Type de compresseur	Type de condenseur	Puissance frigorifique nominale (kW)	Puissance électrique absorbée nominale (kW)	Année d'installation
Groupe n°1	piston	air	385,4	122,8	non disponible
Groupe n°2	vis	eau	1 202,0	201,0	2005
Groupe n°3	piston	eau	855,0	303,0	1990
Groupe n°4	piston	air	214,1	71,3	1995
Groupe n°5	vis	air	393,1	147,6	2004
Groupe n°6	scroll	eau	83,6	22,0	2000
Groupe n°7	piston	eau	458,0	117,0	1985

TAB. 7.1 – Caractéristiques principales des groupes de production d'eau glacée observés.

La période d'observation de chaque groupe est comprise entre 10 et 15 jours. Cette période ne permet pas d'observer tous les modes de fonctionnement des groupes de manière exhaustive. Néanmoins, pour la plupart des groupes instrumentés, les conditions de fonctionnement (tableau 7.2) ont varié de manière significative durant ces périodes d'observation, ce qui nous permet de considérer que les données issues des campagnes de mesures constituent un matériel de travail pertinent pour l'objectif recherché. Il est d'usage de représenter le niveau de puissance auquel fonctionne un groupe frigorifique par le taux de charge τ qui est défini comme le rapport entre la puissance frigorifique fournie P_f et la puissance frigorifique nominale $P_{f\ nom}$. Par analogie, nous introduisons le « taux de charge électrique » τ_a , définie comme le rapport entre la valeur de la puissance électrique absorbée (P_{ac}) et sa valeur nominale ($P_{ac\ nom}$).

Unité	Variables observées				
	$T_{e\ se}$ [°C]	$T_{e\ ec}$ ou $T_{a\ ec}$ [°C]	τ_a [—]	τ [—]	$\dot{m}_{e\ evap}$ [m ³ /h]
Groupe n°1	9,2 - 11	20,8 - 26	0,28 - 0,50	0,19 - 0,43	
Groupe n°2	4,1- 4,4	24,2 - 32	0,53 - 1,03	0,42 - 0,76	204 - 232
Groupe n°3	5,6 - 7,8	30 - 33,3	0,27 - 0,47	0,25 - 0,47	51 - 74
Groupe n°4	3,5 - 11	20 - 30	0,26 - 0,92	0,27 - 0,89	
Groupe n°5	5,5 - 10,3	12,8 - 29	0,14 - 0,64	0,16 - 0,93	
Groupe n°6	5,5 - 8,3	27 - 36	0,30 - 0,68	0,25 - 0,60	
Groupe n°7	12 - 15,7	16 - 19,3	0,46 - 1,01	0,28 - 0,75	

TAB. 7.2 – Domaines de variation des conditions de fonctionnement des groupes de production d'eau glacée observés.

L'observation des variations des conditions de fonctionnement des groupes frigorifiques fait apparaître des « curiosités ».

En effet, pour les groupes fonctionnant à pleine puissance (taux de charge électrique aux environs de 1), nous nous attendons à observer des taux de charge proche de 1 également. Or ce n'est pas ce que nous observons pour les deux groupes dans ce cas (groupe 2 et 7) : la puissance frigorifique fournie lorsque la puissance électrique absorbée est égale à sa valeur nominale est inférieure de 25 % environ à la puissance frigorifique nominale.

Nous avons identifié deux raisons majeures pour expliquer cette observation :

- **une erreur dans les mesures** : comme nous l'avons signalé, l'utilisation d'un débitmètre à ultrasons est sensible et peut biaiser les mesures :
- **un dégradation des performances nominales du groupe de production d'eau glacée** : cette dégradation peut provenir de l'usure des composants des groupes, d'un mauvais entretien (encrassement de l'évaporateur ou du condenseur par exemple, et notamment des condenseurs air), ou encore d'un défaut de charge de fluide frigorigène.

L'observation de l'état général du groupe de production d'eau glacée, ainsi que son âge, pourraient orienter notre analyse, mais nous ne pouvons pas, à la simple lecture des mesures, arbitrer entre ces deux hypothèses. De même, un audit plus précis du fonctionne-

ment du groupe de production d'eau glacée pourrait nous permettre de faire cet arbitrage.

Les résultats concernant le groupe 5 nous font penser qu'il serait nécessaire de procéder à de nouvelles mesures. Cette fois-ci, c'est le phénomène inverse qui est observé : le taux de charge atteint 0,93 alors que dans le même temps le taux de charge électrique ne dépasse pas 0,64. Cela impliquerait une amélioration des performances bien supérieure à ce que l'on peut observer traditionnellement (cf. [Rivière, 2004]). Nous soupçonnons que la mesure du débit a surévalué les performances frigorifiques de ce groupe de production d'eau glacée.

Dans les deux cas, il y a lieu de remettre en cause les résultats des mesures, c'est pourquoi, nous préconisons de les renouveler.

7.2 Evaluation des performances énergétiques des groupes de production d'eau glacée

7.2.1 Détermination de relations explicatives à partir de mesures in situ

Variables indépendantes considérées

Dans un protocole d'évaluation, nous cherchons à caractériser l'influence de la variation de grandeurs physiques caractéristiques de l'environnement ou des besoins énergétiques sur les performances des systèmes évalués. La connaissance d'une grandeur invariable ne présente donc pas d'intérêt, contrairement aux protocoles normalisés pour la certification des performances, dont le but est de vérifier les performances absolues d'un équipement affichées par son constructeur dans un cadre normatif commun à tous les essais sur le même type d'équipements.

Finalement, dans le cas où cette hypothèse est vérifiée, nous allons donc rechercher la relation explicative de la performance des groupes de production d'eau glacée entre les quatre variables suivantes :

- la puissance électrique absorbée, P_{ac} [kW] ;
- la température de l'eau glacée en entrée de l'évaporateur, $T_{e\ ee}$ [°C] ;
- la température de l'eau glacée en sortie de l'évaporateur, $T_{e\ se}$ [°C] ;
- la température de l'air en entrée du condenseur, $T_{a\ ec}$ [°C].

Enfin, il est d'usage d'introduire directement la puissance frigorifique fournie (P_f) ou le taux de charge τ_f auquel fonctionne le groupe frigorifique, à la place d'une autre variable à laquelle elle est liée ($T_{e\ ee}$ ou $T_{e\ se}$). De même, la température d'eau en sortie de l'évaporateur d'un groupe de production d'eau glacée est une grandeur bien connue des exploitants puisqu'elle correspond à la température de consigne sur laquelle est réglé le fonctionnement du groupe de production d'eau glacée. Il est donc également d'usage de conserver cette variable.

Nous introduisons donc la puissance frigorifique P_f , et rechercherons, par exemple, une relation entre :

- le taux de charge électrique, $\tau_a = \frac{P_{ac}}{P_{ac\ nom}} [kW]$;
- le taux de charge frigorifique, $\tau = \frac{P_f}{P_{f\ nom}} [kW]$;
- la température de l'eau glacée en sortie de l'évaporateur, $T_{e\ se} [^{\circ}C]$;
- la température de l'air en entrée du condenseur, $T_{a\ ec} [^{\circ}C]$.

Définition du modèle et résultats

Nous recherchons une relation du type :

- pour les groupes dont le débit d'eau à l'évaporateur est constant :

$$\frac{\hat{P}_{ac}}{P_{ac\ nom}} = b_0 + b_1 T_{e\ se} + b_2 T_{e\ ec} + b_3 \frac{P_f}{P_{f\ nom}} \quad (7.1)$$

- pour les groupes dont le débit d'eau à l'évaporateur est variable :

$$\frac{\hat{P}_{ac}}{P_{ac\ nom}} = b_0 + b_1 T_{e\ se} + b_2 T_{e\ ec} + b_3 \frac{P_f}{P_{f\ nom}} + b_4 \dot{m}_{e\ evap} \quad (7.2)$$

Le tableau 7.3 indique les résultats obtenus pour les sept groupes étudiés. Comme nous l'avons annoncé en début de chapitre, nous ne publions que les éléments statistiques de validation de ces résultats (cf. tableau 7.3).

Critère statistique	R^2	BM	$CV(s_e)$	$test - t$				
				C_0	C_1	C_2	C_3	C_4
Valeur de validation ²	$\pm 7\%$	$\geq 0,75$	$\leq 15\%$	≥ 2				
Groupe n°1	0,87	0,0 %	8,3 %	0,2	1,05	2,03	11,6	
Groupe n°2	0,97	0,0 %	2,9 %	1,7	2,6	2,7	1,4	0,9
Groupe n°3	0,99	-0,02 %	2,0 %	1,86	1,67	1,03	173	0,2
Groupe n°4	0,99	0,0 %	4,8 %	0,75	1,22	4,17	33	
Groupe n°5	0,86	0,0 %	9,5 %	1,6	3,7	9,4	34,9	
Groupe n°6	0,99	-0,11 %	1,7 %	12	24,4	36,2	386	
Groupe n°7	0,93	0,72 %	3,3 %	7,4	5,9	1,12	60,6	

TAB. 7.3 – Validation des relations explicatives de la performances des groupes de production d'eau glacée observés.

Sur les échantillons de mesures que nous avons traités, les coefficients de détermination sont tous supérieurs à 0,87, l'erreur-type maximale est de 9,5%, tandis que le biais du modèle est quasiment nul pour toutes les relations déterminées. En revanche, le test de Student est négatif pour quelques coefficients de régression avec le critère proposé par

²Valeurs préconisées par [IPMVP, 2007] (cf. tableau 5.1)

[IPMVP, 2007]. Néanmoins, il faut relativiser ce jugement au regard de la taille de nos échantillons. En effet, le plus petit de nos échantillons (groupe 3) contient plus de 40 points. D'après les tableaux statistiques, avec des échantillons de cette taille, la valeur de t pour une incertitude de 5% est de 2,021, et de 1,684 pour une incertitude de 10%.

Les variations des débits d'eau mesurés sont supérieures au critère indiqué par [NF 14511] (variation de plus de 5 %). Néanmoins, elles ne dépassent pas plus de 10 % leur valeur moyenne. A ce titre, et les tentatives de régressions le démontrent, le débit d'eau à l'évaporateur ne constitue pas sur cet échantillon une variable indépendante pertinente pour expliquer la consommation du groupe frigorifique.

Ces tests mettent en évidence que les variables sont pertinentes dans la plupart des autres cas. Sur quelques échantillons de mesure, le test de Student négatif peut s'expliquer par une faible variation des variables pendant la période de mesure, mais il nous semble difficile d'en tirer des conclusions générales.

Nous remarquons également qu'aucun des tests statistiques pratiqués ne nous permet de détecter les anomalies de comportement relevées au paragraphe 7.1.

Discussion

Nous avons montré que, à l'aide d'un protocole de mesure adapté aux groupes de production d'eau glacée, nous sommes en mesure de recueillir les données nécessaires à la caractérisation des performances de ces groupes avec la précision requise par un protocole d'évaluation. Toutefois, les relations sont déterminées en faisant une confiance aveugle à la qualité des mesures, or nous savons que l'utilisation d'un appareil de mesure, et notamment du débitmètre à ultrasons est susceptible d'introduire un biais. D'ailleurs, des anomalies ont été relevées lors de l'observation des mesures, mais nous ne sommes pas capables d'en identifier clairement l'origine. Pour les séries de mesures présentant ces anomalies, nous suggérons de procéder à une nouvelle campagne en soignant la disposition des sondes du débitmètre à ultrasons ainsi que son étalonnage, car nous ne disposons pas des éléments nous permettant d'écarter l'hypothèse d'une mauvaise réalisation du protocole de mesure.

La caractérisation des performances des groupes frigorifiques sur les jeux de données apparemment corrects ne nécessite aucun prérequis en terme de connaissance du fonctionnement des machines thermodynamiques, ni de compétences spécifique en simulation. Cette opération peut donc être automatisée et facilement mise en œuvre par un évaluateur de manière à construire des relations explicatives du comportement des groupes de production d'eau glacée.

Nous illustrons ce résultat en présentant la comparaison entre la mesure de la puissance électrique absorbée et son estimation par la relation que nous venons de déterminer (figures 7.1 et 7.2). Nous présentons le cas le plus défavorable (groupe 5).

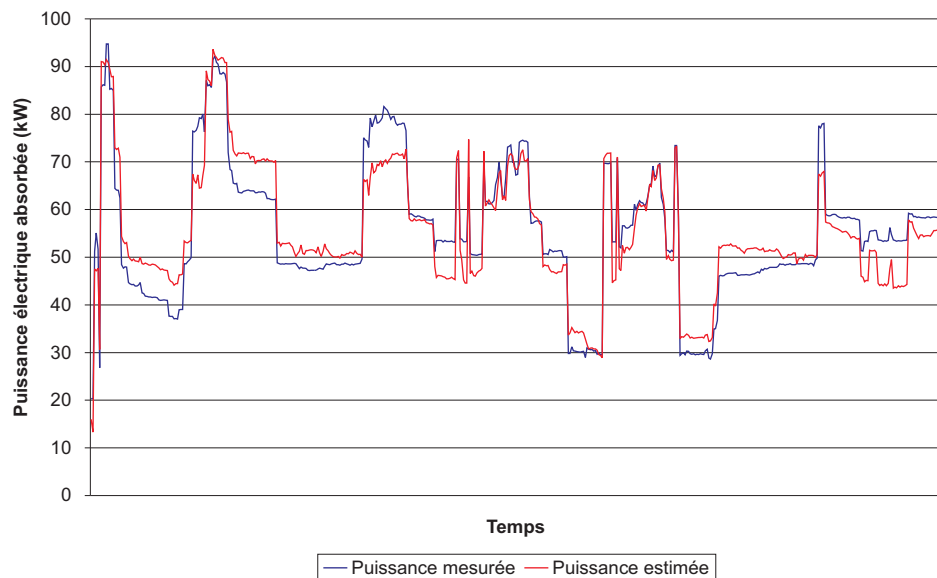


FIG. 7.1 – Comparaison entre la puissance électrique absorbée mesurée et la puissance électrique estimée du groupe n°5.

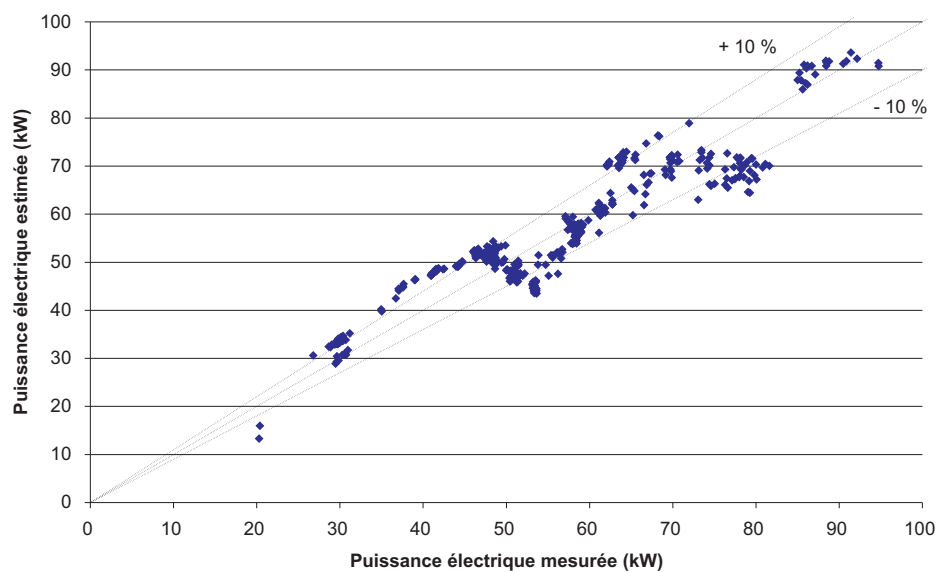


FIG. 7.2 – Comparaison entre la puissance électrique absorbée estimée et la puissance électrique mesurée (groupe n°5).

Ces relations sont a priori valables uniquement sur les domaines de variations présentés dans le tableau 7.2. De plus, nous remarquons, par exemple, que seulement deux groupes de production d'eau glacée sur les sept que nous avons instrumentés ont été mesurés à pleine charge. Nous pouvons donc conclure que pour ces groupes, il serait nécessaire d'étendre la période d'évaluation pour caractériser totalement leur comportement.

La valeur des coefficients des relations explicatives déterminées par régression linéaire est spécifique à chaque groupe. Il est donc indispensable de réaliser le protocole de me-

sure décrit au paragraphe 6.3, et de disposer de mesures de qualité pour déterminer ces relations.

7.2.2 Modèles paramétriques

Les documents « constructeurs » des groupes de production d'eau glacée présentent de nombreuses informations sur leurs performances déterminées dans le cadre d'essais normalisés que nous avons déjà évoqués (cf. [NF 14511]). Par ailleurs, un grand nombre de ces documents affichent également les performances attendues des groupes de production d'eau glacée dans des conditions de fonctionnement différentes des conditions nominales à pleine charge. Ces performances en conditions non nominales sont toutefois mesurées avec le même protocole de mesure normalisé que celui qui est décrit dans [NF 14511]. En revanche, les points de fonctionnement affichés ne concernent que le fonctionnement à pleine charge du groupe de production frigorifique.

Nous allons donc présenter un modèle de description des performances des groupes frigorifiques pouvant être paramétré à l'aide des informations disponibles sur les documents « constructeurs ». Nous verrons également comment exploiter certains indicateurs présents dans ces documents, de manière à caractériser le comportement à charge partielle des groupes de production d'eau glacée.

Choix du type de modèle

Les approches utilisées pour la représentation des performances des groupes de production d'eau glacée peuvent être classées en trois catégories [Roujol, 2003] :

- *les modèles physiques simplifiés* : ces modèles proposent une représentation simplifiée des phénomènes physiques dans un groupe de production d'eau glacée. Pour cela, chaque éléments du groupe est modélisé (modèle interne) ;
- *les modèles en temps fini* : Il s'agit d'une approche globale, basée sur les principes de la thermodynamique et sur une analyse des sources d'irréversibilité ;
- *les modèles empiriques* : ces modèles reposent sur une ou plusieurs relations entre les caractéristiques des performances des groupes frigorifiques. Les relations explicatives des performances que nous avons déterminées dans le chapitre précédent sont un exemple de modèle empirique.

Nous reprenons à notre compte l'analyse menée dans [Roujol, 2003], et dont les résultats sont synthétisés dans le tableau 7.4. Cette analyse nous conduit à écarter tout naturellement les modèles physiques dont l'utilisation requiert de trop grande compétences en matière de simulation. A l'inverse, les deux autres catégories de modèles sont paramétrables assez facilement à partir de quelques points de fonctionnement. Cependant, toujours d'après [Roujol, 2003], les modèles en temps fini rencontrent quelques difficultés à représenter le fonctionnement à charge partielle des groupes de production d'eau glacée, tandis que les modèles empiriques assurent une erreur inférieure à 5 % entre leurs résultats et les données « constructeurs ». C'est pourquoi nous concluons que les modèles empiriques sont les plus adaptés à la représentation des groupes de production d'eau glacée dans le cadre d'un protocole d'évaluation.

Type de modèles	Avantages	Inconvénients
<i>Modèles physiques</i>	Base physique Précision Adaptabilité	Lourdeur d'utilisation Besoin important d'informations pour un paramétrage rigoureux Compétences fortes en modélisation requises
<i>Modèles en temps fini</i>	Base physique Facilité de paramétrage	Paramètres parfois sans signification physique Difficulté à représenter la charge partielle
<i>Modèles empiriques</i>	Polyvalence Précision Facilité de paramétrage Simplicité	Pas de base physique Manque de robustesse à la limite du domaine de validité

TAB. 7.4 – Analyse pour la sélection des modèles de groupes de production d'eau glacée (d'après [Roujol, 2003])

Définition du modèle retenu

[Roujol, 2003] présente un autre modèle empirique relativement simple. Ce modèle, nommé REFLIQ, est employé dans [ConsoClim, 2002]. Il distingue la représentation du comportement des groupes de production glacée à pleine charge en conditions non nominales, de la représentation de leur comportement à charge partielle. Ce modèle a été choisi pour sa simplicité et son nombre réduit de paramètres par rapport aux autres modèles de la même famille (cf. [Rivière, 2004]).

Le modèle REFLIQ à pleine charge fait également intervenir les données du point de fonctionnement nominal. Il est composé de trois équations. La première équation détermine la capacité frigorifique du groupe de production d'eau glacée en fonctionnement dans des conditions non nominales :

$$P_{f\ fl} = P_{f\ nom} [1 + D_1 (T_{e\ ec} - T_{e\ ec\ nom}) + D_2 (T_{e\ se} - T_{e\ se\ nom})] \quad (7.3)$$

avec :

- $P_{f\ fl}$ en $[kW]$, la puissance frigorifique à pleine charge aux conditions non nominales de fonctionnement ;
- $P_{f\ nom}$ en $[kW]$, la puissance frigorifique à pleine charge aux conditions nominales de fonctionnement ;
- $T_{e\ se}$ en $[^{\circ}C]$, la température de l'eau glacée en sortie de l'évaporateur aux conditions non nominales de fonctionnement ;
- $T_{e\ se\ nom}$ en $[^{\circ}C]$, la température de l'eau glacée en sortie de l'évaporateur aux conditions nominales de fonctionnement ;
- $T_{e\ ec}$ en $[^{\circ}C]$, la température de l'eau en entrée du condenseur aux conditions non nominales de fonctionnement ;
- $T_{e\ ec\ nom}$ en $[^{\circ}C]$, la température de l'eau en entrée du condenseur aux conditions nominales de fonctionnement ;

- D_1 et D_2 , les coefficients de régression.

La seconde équation détermine la puissance électrique absorbée correspondant à la capacité frigorifique à pleine charge :

$$\frac{P_{a\ fl}}{P_{f\ fl}} = \frac{P_{a\ nom}}{P_{f\ nom}} (1 + C_1 \Delta T + C_2 \Delta T^2) \quad (7.4)$$

avec :

- $P_{a\ fl}$ en $[kW]$, la puissance électrique absorbée à pleine charge aux conditions non nominales de fonctionnement ;
- $P_{a\ nom}$ en $[kW]$, la puissance frigorifique à pleine charge aux conditions nominales de fonctionnement ;
- C_1 et C_2 , les coefficients de régression.

et

$$\Delta T = \frac{T_{e\ ec}}{T_{e\ se}} - \frac{T_{e\ ec\ nom}}{T_{e\ se\ nom}}$$

Enfin, une troisième équation permet de rendre compte des performances du groupe frigorifique à charge partielle :

$$\frac{P_a}{P_{a\ fl}} = K_{cp} \frac{P_f}{P_{f\ fl}} + (1 - K_{cp}) \left(\frac{P_f}{P_{f\ fl}} \right)^2 \quad (7.5)$$

où K_{cp} est un paramètre appelé « paramètre de charge partielle ».

Paramétrage du modèle

La structure de ce modèle impose de procéder à un paramétrage par étape : les paramètres doivent être déterminés dans l'ordre dans lequel sont présentées les équations 7.3, 7.4 et 7.5. Il est donc indispensable de disposer de points de fonctionnement à pleine charge et à charge partielle, afin de procéder au paramétrage du modèle sur ces deux modes de fonctionnement.

Si les données sont issues de mesures, il convient d'isoler les points de fonctionnement correspondant à la pleine charge et de réaliser un premier paramétrage permettant de déterminer les coefficients C_i et D_i . Puis dans un second temps, le reste des points de fonctionnement mesurés permet de déterminer le paramètre de charge partielle K_{cp} .

Erreurs de mesures mises à part, ce paramétrage ne pose aucun problème, et le modèle REFLIQ permet d'expliquer avec une bonne précision la consommation d'électricité du groupe frigorifique étudié (cf. figure 7.3). [Rivière, 2004] a validé les performances de ce modèle sur des données réalisées sur un banc d'essais consacré à la mesure des performances des groupes de production d'eau glacée.

Nous avons également pu vérifier ces performances à l'aide des données mesurées sur le groupe 4 : il s'agit du seul groupe dont les mesures ne semblent pas biaisées et dont le fonctionnement à pleine charge a pu être observé. Le tableau 7.5 confirme que REFLIQ permet de représenter avec précision la puissance électrique absorbée par le groupe 4.

Critère statistique	Valeur du critère
R^2	0,99
BM	0,4 %
$CV(s_e)$	4,8 %
$test - t$ sur C_1	3,3
$test - t$ sur C_2	6,7
$test - t$ sur D_1	4,0
$test - t$ sur D_2	7,2
$test - t$ sur K_{cp}	50,2

TAB. 7.5 – Validation du modèle REFLIQ sur les données du groupe 4.

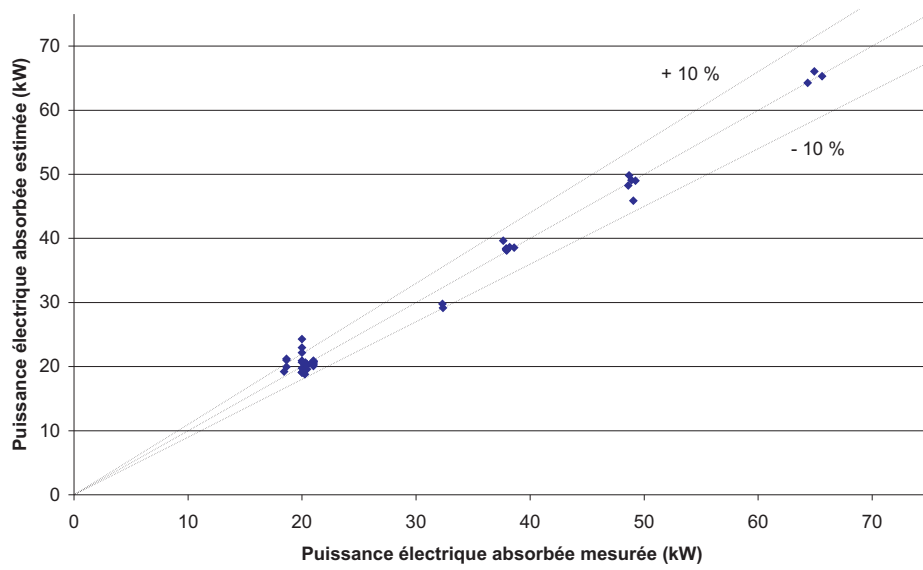


FIG. 7.3 – Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage sur données mesurées (Groupe 4).

Pour les autres groupes sur lesquels nous avons déployé le protocole de mesure décrit au chapitre 6, nous n'avons pas pu observer de fonctionnement à pleine charge. Comme nous l'avons évoqué au chapitre précédent, les conditions d'essais de groupes de production d'eau glacée en exploitation sont soumises aux obligations d'exploitation. De même, l'exploitant n'est pas en mesure de forcer les groupes frigorifiques à fonctionner à pleine charge. Dans ces cas-là, il est impossible de paramétrer ce modèle à l'aide de données mesurées. Il faut donc avoir recours à une autre source de données : les données « constructeurs ».

Paramétrage de la pleine charge sur données « constructeurs »

Certains constructeurs présentent des données de performances des groupes de production d'eau glacée dans des conditions de fonctionnement non nominales et à pleine charge. Les points de fonctionnement fournis ne concernent pas le fonctionnement à charge partielle.

Les renseignements fournis dans les documents « constructeurs » sont déterminés dans le cadre d'essais normalisés pour les variations des conditions de fonctionnement suivantes : la température en sortie de l'évaporateur est comprise entre 5 et 10°C, tandis que la température d'eau est comprise entre 25 et 40°C. Ceci représente donc un échantillon plus important que les conditions de fonctionnement que nous pouvons observer sur site. Cet échantillon offre donc la possibilité de paramétrer le modèle à pleine charge et sans avoir recours à des mesures pour ce mode de fonctionnement.

Nous n'avons malheureusement pas pu faire l'expérience de ce paramétrage à l'aide des données « constructeurs » car nous ne disposons pas de ces données. Cet expérience démontre en revanche que la collecte des documents « constructeurs » n'est pas une tâche aisée. L'âge de certains groupes peut expliquer l'absence de documents, mais les constructeurs ne fournissent pas tous ces données avec la même générosité.

Paramétrage de la pleine charge à l'aide de valeurs par défaut

En l'absence de points de mesure et de données « constructeurs » sur les performances du fonctionnement à pleine charge d'un groupe de production d'eau glacée, il reste une dernière possibilité de paramétrage du modèle REFLIQ : l'utilisation de valeurs par défaut.

A partir des documents « constructeurs », une campagne de paramétrage a été réalisée sur de nombreux groupes de production d'eau glacée, à partir de données des catalogues « constructeurs » (cf. [Roujol, 2003]). Ces résultats font apparaître l'existence de valeurs de paramètres communes à des catégories de groupes frigorifiques (cf. [ConsoClim, 2002]). Contrairement au modèle linéaire simple, il est donc possible de déterminer des valeurs des paramètres, que nous appellerons « valeurs par défaut », selon le type de compresseur et de condenseur qui composent le groupe de production d'eau glacée, comme le montre le tableau 7.6.

Coefficients	condenseur à air			condenseur à eau		
	Piston	Vis	Scroll	Piston	Vis	Scroll
C_1	4,5	8,15	8,15	6,92	7,05	8,93
C_2	-0,04	24,15	24,15	21,9	25,89	69,74
D_1	-0,014	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
D_2	0,0034	0,0033	0,0033	0,0032	0,03	0,032

TAB. 7.6 – Valeurs par défaut des coefficients du modèle REFLIQ (d'après [ConsoClim, 2002])

L'utilisation de valeurs par défaut augmente naturellement l'incertitude du modèle sur la détermination des performances d'un groupe particulier. Dans le cas le plus défa-

vorable, à la limite du domaine de validité, cette incertitude peut atteindre près de 14 %. Cependant, elle reste la plupart du temps inférieure à 10 % [Roujol, 2003].

A l'aide des données en notre possession, nous avons paramétré le modèle REFLIQ à pleine charge en utilisant les valeurs par défaut, puis nous avons procédé à un paramétrage sur les mesures pour déterminer le paramètre de charge partielle K_{cp} . Les résultats sur la détermination de la puissance électrique absorbée par les groupes sont légèrement dégradés mais restent tout à fait satisfaisants (cf. exemple sur la figure 7.4) : comme on le peut le lire dans le tableau 7.7, dans le pire des cas, le biais du modèle sur la détermination de la puissance électrique est de 1,2 % et son erreur-type de 11,8 %.

Critère statistique	R^2	BM	$CV(s_e)$	$test - t$
Valeur de validation ²	$\geq 0,75$	$\pm 7\%$	$\leq 15\%$	≥ 2
Groupe n°1	0,98	0,9 %	10,7 %	40,5
Groupe n°2	0,99	-1,3 %	2,5 %	75
Groupe n°3	0,99	- 0,1%	4,3 %	405
Groupe n°4	0,99	0,6 %	9,1 %	29
Groupe n°5	0,98	1.0 %	11,8 %	90
Groupe n°6	0,99	-0,1 %	3,7 %	1110
Groupe n°7	0,99	-0,1 %	7,3 %	269

TAB. 7.7 – Validation statistique du paramétrage du modèle de charge partielle sur les groupes observés.

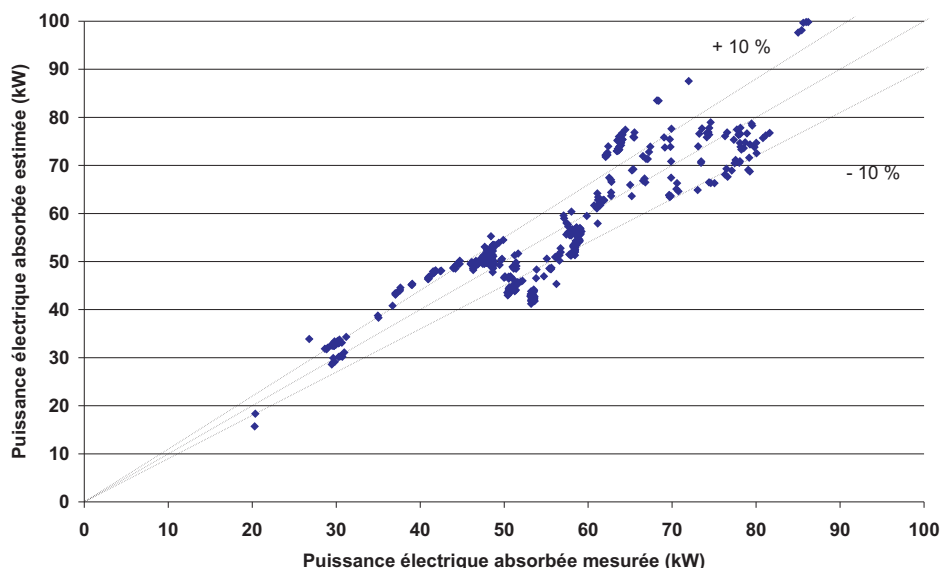


FIG. 7.4 – Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la pleine charge avec valeurs par défaut (Groupe 5).

²Valeurs préconisées par [IPMVP, 2007] (cf. tableau 5.1)

Ainsi, nous sommes en mesure de paramétrer un modèle explicatif des performances d'un groupe de production d'eau glacée en utilisant les résultats d'essais normalisés fournis par les documents « constructeurs » et des mesures réalisées sur site pour caractériser la charge partielle. Ceci permet donc d'alléger la procédure de mesures puisqu'il n'est plus indispensable de mesurer sur site les performances des groupes de production d'eau glacée à pleine charge, celui-ci étant est un mode de fonctionnement peu évident à observer.

Nous nuancions de nouveau ces propos, en soulignant le fait qu'une fois de plus, nous ne pouvons pas distinguer, avec les informations en notre possession, si les anomalies identifiées sur les mesures que nous avons traitées proviennent d'erreurs de mesures ou de la dégradation des performances à la simple lecture des données et des résultats donnés par le modèle. En revanche, si nous pouvons consolider la confiance dans les mesures par recoupement avec d'autres informations (comme la production frigorifique totale produite par l'ensemble des groupes composant l'installation, par exemple), ce modèle pourrait être adapté aux méthodes d'audit et servir à caractériser les dégradations des groupes de production d'eau glacée. Par suite, nous serions capable de chiffrer les conséquences de cette dégradation sur la facture énergétique.

Par ailleurs, nous rappelons que la recherche des valeurs par défaut a été réalisée sur un échantillon de groupes frigorifiques récents présentés dans les catalogues, et qu'ils ne concernent pas les groupes frigorifiques à compresseur centrifuge. Ces derniers sont généralement assemblés au cas par cas. Par conséquent, les documents « constructeurs » auxquels nous avons eu accès ne fournissent pas autant de points de fonctionnement que pour les autres types de groupes, ce qui ne permet pas de conclure quant à la faisabilité du paramétrage du modèle REFLIQ sur ce type de groupes.

Paramétrage de la charge partielle sur données « constructeurs »

Jusqu'à présent, les documents « constructeurs » ne contenaient aucune information concernant les performances à charge partielle des machines frigorifiques. Depuis 2005, les documents « constructeurs » des groupes de production d'eau glacée ont été enrichis par la détermination, dans des conditions normalisées, d'un indice représentatif des performances à charge partielle des groupes. Cet indice, désigné *ESEER*¹, a été introduit dans le but de comparer les machines frigorifiques les unes aux autres.

Il a été construit de manière à représenter les performances des machines frigorifiques dans des conditions de fonctionnement moyennes en Europe. Il est déterminé à partir de la relation suivante (cf. [Rivière, 2004]) :

$$ESEER = 0,003.EER_{100\%} + 0,33.EER_{75\%} + 0,41.EER_{50\%} + 0,23.EER_{25\%} \quad (7.6)$$

où $EER_X\%$ est le coefficient de performance *EER* au taux de charge $X\%$. Ce taux de charge est défini comme le rapport de la puissance frigorifique fournie par le groupe de production d'eau glacée à la puissance frigorifique nominale du groupe. Ces coefficients de charge partielle sont déterminés dans des conditions de fonctionnement normalisées. Le tableau 7.8 indique les températures d'eau ou d'air à imposer en entrée du condenseur pour mesurer les performances normalisées à pleine charge à partir desquelles sont calculés

¹*ESEER* : « European Seasonal Energy Efficiency Ratio »

les différents niveaux de charge partielle des groupes de production d'eau glacée. Cette variation de température de l'eau ou de l'air en entrée du condenseur est destinée à prendre en compte les variations climatiques qui entraînent une baisse du taux de charge des machines frigorifiques. Notons que la température d'eau en sortie de l'évaporateur ne varie pas et reste fixée à $7^{\circ}C$

Taux de charge	Condenseur à air	Condenseur à eau
100 %	$35^{\circ}C$	$30^{\circ}C$
75 %	$30^{\circ}C$	$26^{\circ}C$
50 %	$25^{\circ}C$	$22^{\circ}C$
25 %	$20^{\circ}C$	$18^{\circ}C$

TAB. 7.8 – Conditions de fonctionnement normalisées pour la détermination du *ESEER* d'un groupe de production d'eau glacée.

Les différents taux de charge utilisés pour le calcul de cet indice ne correspondent pas nécessairement aux taux de charge auxquels la machine frigorifique est capable de fonctionner : il s'agit de taux de charge normalisés. Le cas échéant, la performance des machines frigorifiques à ces taux de charge est obtenue par interpolation entre les performances réelles du groupe aux taux de charge auxquels la machine peut fonctionner. Ces taux de charge dépendent naturellement des différents étages de compression existants sur l'installation.

Quoiqu'il en soit, cet indice *ESEER* donne une représentation du comportement de la machine frigorifique à charge partielle. De plus, les constructeurs engagés dans le programme de certification Eurovent-Certification² affichent désormais l'indice *ESEER* des groupes frigorifiques proposés dans leur catalogue de vente, et ces informations sont accessibles très facilement sur le site Internet de l'association Eurovent. Nous proposons donc d'utiliser cette information pour paramétrer le modèle de charge partielle REFLIQ.

Nous paramétrons donc le modèle REFLIQ en suivant la méthode de paramétrage suivante :

1. Calcul des performances du groupe de production d'eau glacée à pleine charge pour les différentes conditions de fonctionnement associées au taux de charge X % :

$$P_{f\ fl\ X\ \%} = P_{f\ nom} [1 + D_1 (T_{e\ ec\ X\ \%} - T_{e\ ec\ nom}) + D_2 (T_{e\ se} - T_{e\ se\ nom})] \quad (7.7)$$

$$\frac{P_{a\ fl\ X\ \%}}{P_{f\ fl\ X\ \%}} = \frac{P_{a\ nom}}{P_{f\ nom}} (1 + C_1 \Delta T_{X\ \%} + C_2 \Delta T_{X\ \%}^2) \quad (7.8)$$

Les coefficients C_i et D_i peuvent être déterminés à l'aide des données fournies par les documents « constructeurs » pour la pleine charge, ou à l'aide des valeurs par défaut.

²<http://www.eurovent-certification.com/index.php.fr>

2. Calcul de la puissance frigorifique appelée aux différents taux de charge :

$$P_{f \text{ X } \%} = \frac{X}{100} P_{f \text{ nom}} \quad (7.9)$$

3. Calcul des performances à charge partielle à l'aide d'une valeur initiale du paramètre K_{cp} (par exemple, $K_{cp} = 1$) :

$$\frac{P_{ac \text{ X } \%}}{P_{ac \text{ fl X } \%}} = K_{cp} \frac{P_{f \text{ X } \%}}{P_{f \text{ fl X } \%}} + (1 - K_{cp}) \left(\frac{P_{f \text{ X } \%}}{P_{f \text{ fl X } \%}} \right)^2 \quad (7.10)$$

puis

$$EER_X \% = \frac{P_{f \text{ X } \%}}{P_{ac \text{ X } \%}} \quad (7.11)$$

4. Calcul de l'indice $ESEER$:

$$ESEER = 0,003.EER_{100 \%} + 0,33.EER_{75 \%} + 0,41.EER_{50 \%} + 0,23.EER_{25 \%} \quad (7.12)$$

5. Comparaison de la valeur de l'indice $ESEER$ calculée avec la valeur affichée par le constructeur, puis retour à l'étape 3 en cas d'inégalité.

A l'aide d'un solveur, on détermine assez rapidement la valeur du paramètre de charge partielle permettant de retrouver la valeur de l'indice $ESEER$ donnée par le constructeur.

Nous avons pu tester cette méthode sur les groupes 2 et 5, qui sont les seuls groupes suffisamment récents pour faire partie du programme de certification d'Eurovent. Les mesures que nous avons réalisées sur ces groupes ne nous ont pas permis de caractériser la pleine charge. Nous utilisons donc les valeurs par défaut de [ConsoClim, 2002] pour paramétrer le modèle de pleine charge. Nous avons ensuite procédé au paramétrage du modèle de charge partielle en suivant les deux méthodes disponibles : d'abord à l'aide des mesures réalisées, puis avec la méthode basée sur la valeur de l'indice $ESEER$, que nous venons de présenter. Les résultats sur la détermination de la puissance électrique absorbée obtenue par l'emploi de ces deux méthodes sont présentées dans le tableau 7.9.

		Résultats obtenus avec le paramétrage de K_{cp} sur les données mesurées	
			l'indice $ESEER$
Groupe n°2	Biais sur P_{ac}	-1,3 %	1,4 %
	Erreur-type sur P_{ac}	2,5 %	4,3 %
Groupe n°5	Biais sur P_{ac}	1,0 %	-4,5 %
	Erreur-type sur P_{ac}	11,8 %	12,1 %

TAB. 7.9 – Comparaison des résultats obtenus par REFLIQ selon la méthode de détermination du paramètre de charge partielle.

Nous observons que l'utilisation de l'indice normalisé *ESEER* pour la caractérisation de la charge partielle ne modifie pas de manière sensible les résultats donnés par le modèle lorsque le paramètre de charge partielle est déterminé sur les données mesurées. Les résultats de ces modèles sont illustrés sur les figures 7.5 et 7.6.

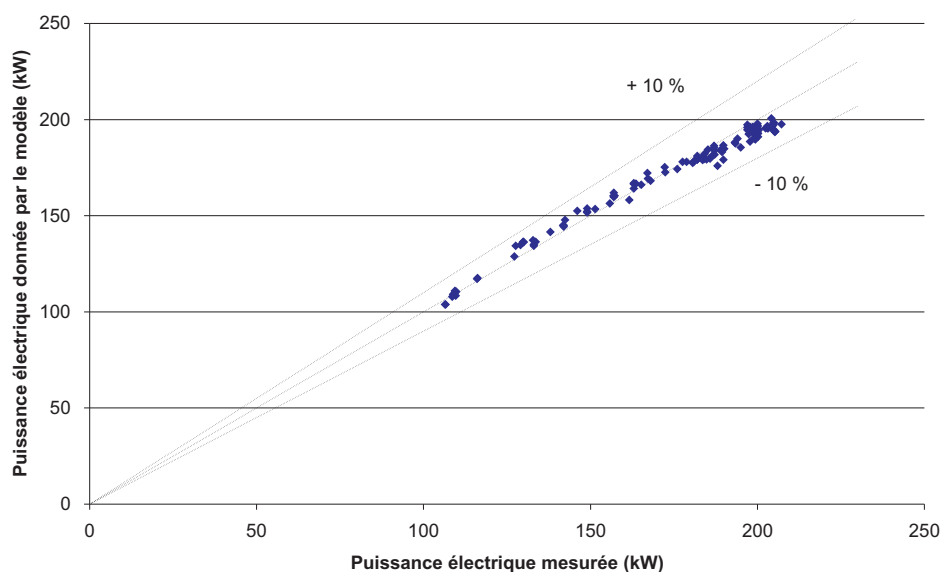


FIG. 7.5 – Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la charge partielle sur données mesurées pour le groupe 2.

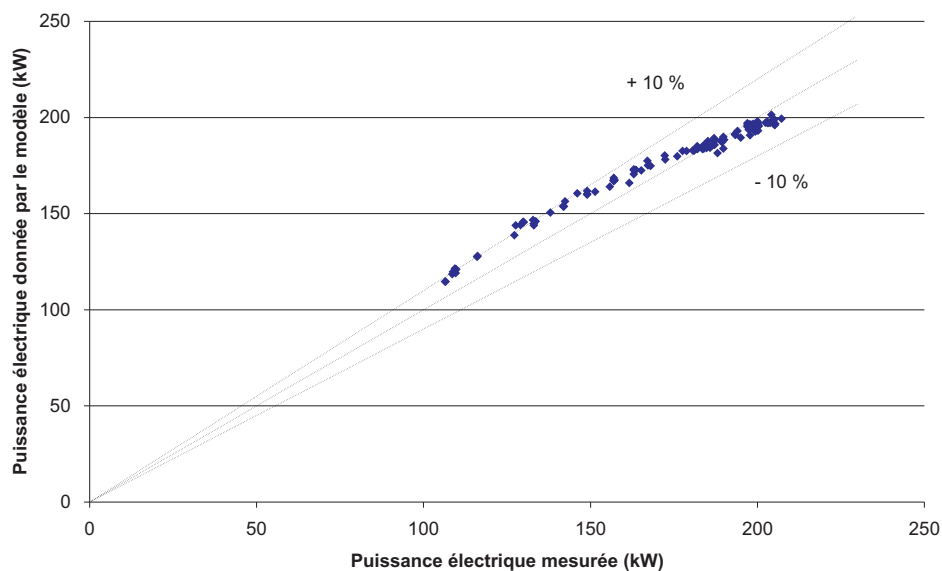


FIG. 7.6 – Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la charge partielle sur données « constructeurs » (indice *ESEER*) pour le groupe 2.

Il est donc possible de paramétrer entièrement le modèle REFLIQ sur les données fournies par les documents « constructeurs », ou à l'aide de valeurs par défaut pour la pleine charge. Cette méthode n'est applicable qu'aux groupes récents, faisant partie des

offres commerciales actuelles des constructeurs. Pour les groupes plus anciens, la mise en œuvre d'un protocole de mesure des performances à charge partielle reste indispensable.

Il faut cependant remarquer que la détermination du paramètre de charge partielle K_{cp} sur l'indice *ESEER* comporte forcément un biais dû au fait que cet indice est obtenu par une moyenne pondérée de coefficients de performance des groupes frigorifiques. Il attribue, en particulier, un poids important aux taux de charge compris entre 50 % et 75 %, ce qui ne correspond pas nécessairement aux taux de charge auxquels fonctionne le groupe évalué. De plus, comme nous l'avons signalé, pour les groupes de production d'eau glacée dont les étages de compression ne permettent pas d'atteindre réellement les taux de charge normalisés pour le calcul de l'*ESEER*, les performances utilisées pour le calcul de cet indice sont des données interpolées. Notons cependant, que cela concerne surtout les faibles taux de charge, en particulier le taux de charge à 25 %, auquel peu de groupes sont capables de fonctionner.

Nous avons cherché à déterminer des valeurs par défaut pour le paramètre de charge partielle K_{cp} , de la manière que [Roujol, 2003] a pu le faire pour la pleine charge. Les paramètres de pleine charge représentent la variation de capacité frigorifique et de la puissance électrique associée due à la variation des conditions extérieures de fonctionnement. Ces paramètres représentent principalement le comportement thermodynamique des composants du groupe, et on peut se rendre compte que les valeurs de ces paramètres sont relativement proches les unes des autres.

Le comportement à charge partielle d'une machine frigorifique est plus complexe et dépend en grande partie de son infrastructure. Outre le type de compresseur utilisé, deux paramètres influent notamment sur le comportement à charge partielle d'un groupe : le nombre de circuits frigorifiques et le nombre d'étages de compression utilisés. Chaque constructeur développe des groupes de production d'eau glacée en combinant ces deux paramètres, lesquels varient en fonction de la gamme de produits, de la puissance du groupe, mais également de la stratégie de fractionnement de la puissance choisie par le constructeur. Notons d'ailleurs, que ce dernier paramètre joue directement sur la valeur de l'indice *ESEER* du groupe, et que l'on peut s'attendre naturellement que les stratégies de fractionnement de la puissance des machines frigorifiques récentes soient orientées de manière à améliorer la valeur de cet indice.

Enfin, dans une même gamme de groupes de production d'eau glacée d'un même constructeur, la variété de ces choix conduit à des comportements variables selon les groupes. Par exemple, le tableau 7.10 présente les performances nominales, l'*EER* et l'indice *ESEER* de trois groupes frigorifiques du même constructeur, dans la même gamme : il s'agit de groupes à compresseur vis et à condensation à eau, composés chacun de deux circuits frigorifiques et de six étages de puissance. Nous avons reporté dans ce tableau l'écart relatif entre l'*ESEER* et l'*EER* de chaque groupe, et la valeur du paramètre K_{cp} que nous avons déterminée.

Caractéristiques	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Puissance frigorifique (kW)	374	509	651
Puissance électrique (kW)	77,1	102	130
EER	4,85	5,00	5,01
$ESEER$	6,06	6,01	5,73
variation $ESSEER/EER$	+25 %	+20,2 %	+14,6 %
K_{cp}	0,93	1,0	1,1

TAB. 7.10 – Comparaison du comportement à charge partielle de trois groupes de production d’eau glacée issus de la même gamme de produit.

Nous observons donc que le comportement à charge partielle varie d’un groupe à l’autre quand bien même ces groupes sont issus de la même gamme de produit d’un même constructeur. Les paramètres de structure des groupes frigorifiques (nombre de circuits, nombre d’étages de puissance) ne sont pas suffisant pour expliquer les différences de comportement.

Il nous paraît plus raisonnable de se référer aux valeurs « constructeurs », disponibles en ligne sur le site d’Eurovent, pour paramétrer la charge partielle spécifiquement sur chaque groupe.

7.3 Représentation du comportement des tours de refroidissement

7.3.1 Modèle empirique

Nous présentons l’exploitation de mesures réalisées sur une tour de refroidissement humide en collaboration avec Elyo Cylergie. Nous ne sommes malheureusement pas en mesure de publier ces données expérimentales, qui sont la propriété d’Elyo Cylergie dans le cadre de la convention de recherche conclue entre le Centre Energétique et Procédés et Elyo Cylergie.

Ces mesures ont été réalisées sur une semaine et couvrent les conditions de fonctionnement suivantes :

Conditions de fonctionnement	Domaine de variation de la grandeur mesurée
$T_{e\ et}\ en\ [^{\circ}C]$	19,8 à 29,2
$T_{ha},\ [^{\circ}C]$	10,7 à 17,4
$\dot{m}_{e\ et},\ [kg/s]$	17,7 à 25,0

TAB. 7.11 – Conditions de fonctionnement de la tour de refroidissement instrumentée.

De la même manière que pour les groupes de production d’eau glacée, nous avons recherché une relation explicative de la puissance électrique absorbée par la tour de re-

froidissement, par régression linéaire du premier ordre avec ces trois variables ainsi que la température d'eau en sortie de la tour. Elle se présente donc sous la forme :

$$\hat{P}_{at} = b_0 + b_1.T_{ha} + b_2.T_{e\ et} + b_3.\dot{m}_{e\ et} + b_4.T_{e\ st} \quad (7.13)$$

D'après le tableau 7.12, la régression linéaire est validée. Nous avons donc déterminé une relation explicative convenable de la performance de la tour de refroidissement. Cette validation est présentée graphiquement sur les figures 7.7 et 7.8.

Critère statistique	Valeur de validation ²	Valeur des tests sur la tour
R^2	$\geq 0,75$	0,93
$CV(s_e)$	$\leq 15\%$	7,9 %
BM	$\pm 7\%$	0,0 %
statistique t		
b_0		6,03
b_1	≥ 2	29,16
b_2		4,58
b_3		5,76
b_4		5,07

TAB. 7.12 – Validation statistique des relations explicatives.

Il est important de noter que l'une des variables explicatives des performances des tours de refroidissement est une variable extérieure à l'installation de production d'eau glacée. Il s'agit de la température humide de l'air ou de la température sèche s'il s'agit d'un aéroréfrigérant. La mesure de cette température sur la période de suivi est donc indispensable pour réaliser l'ajustement des consommations de cet équipement.

²Valeurs préconisées par [IPMVP, 2007] (cf. tableau 5.1)

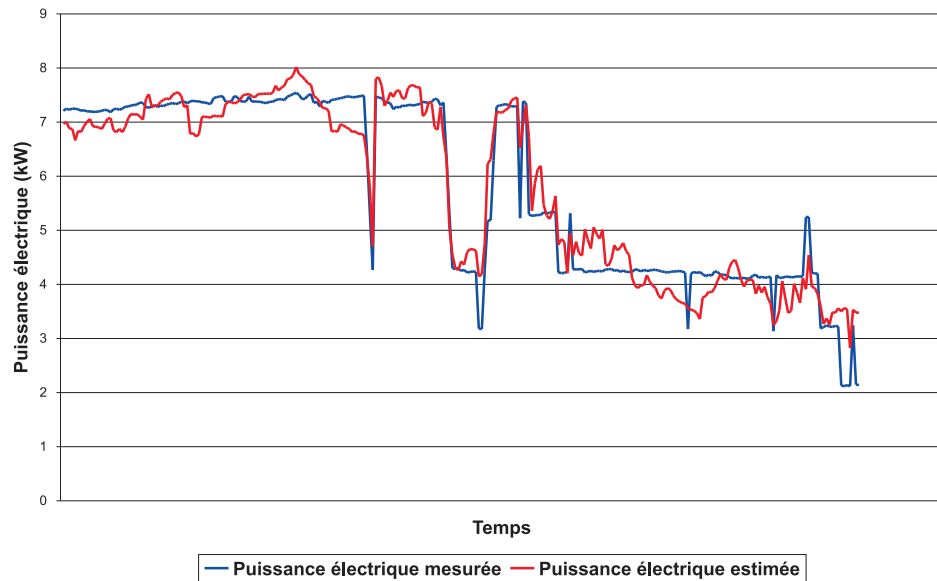


FIG. 7.7 – Comparaison entre l'évolution dans le temps de la mesure de la puissance électrique absorbée par la tour et de son estimation.

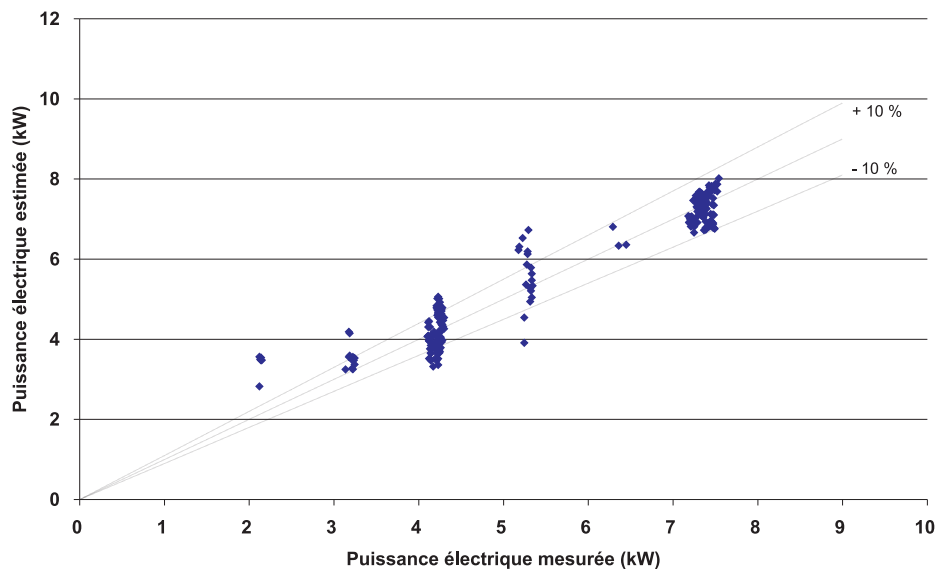


FIG. 7.8 – Comparaison entre la puissance électrique absorbée par la tour mesurée et avec son estimation.

7.3.2 Modèles paramétriques

Dans la même manière que pour les groupes de production d'eau glacée, nous recherchons des modèles nous permettant de déterminer les performances des tours de refroidissement humide ouvertes sans l'aide de ces mesures. Nous avons donc recours aux données des documents « constructeurs » et de modèles paramétriques. Nous disposons du catalogue électronique d'un constructeur de tour de refroidissement, ce qui nous permet d'extraire des points de fonctionnement des tours. Cependant, il faut noter dès à présent,

que ces points de fonctionnement ne concernent que le fonctionnement à pleine charge des tours. Nous ne disposons donc pas de points de fonctionnement à charge partielle, lorsque le débit d'air traversant la tour varie.

C'est pourquoi, il nous est impossible de rechercher des relations explicatives par régression linéaire simple comme nous l'avons fait au chapitre précédent. Nous devons donc avoir recours à des modèles décrits dans la littérature, permettant de représenter la variation de la performance des tours de refroidissement en fonction de la variation de débit d'air dans la tour.

Dans le cadre de nos travaux de recherche pour la représentation des tours de refroidissement, nous avons étudié deux modèles différents permettant de représenter les performances thermiques de tours. Le premier est un modèle d'efficacité dérivé de l'analyse de Merkel, tandis que le second est un modèle plus empirique.

Modèle d'efficacité (TAO)

Description du modèle

Il existe de nombreux modèles dans la littérature pour représenter le comportement thermique des tours de refroidissement humides. [Stabat, 2003] a comparé un grand nombre d'entre eux et a montré que la plupart d'entre eux ne permet pas de calcul les performances thermiques des tours à charge partielle, c'est-à-dire pour un débit d'air traversant la tour inférieur au débit nominal. [Stabat, 2003] propose une amélioration des modèles d'efficacité existants, basés sur l'analyse de Merkel, afin de prendre en considération ce point qui nous intéresse tout particulièrement. Ce modèle, appelé TAO, permet également de représenter les tours de refroidissement à courants croisés, là où les autres modèles ne permettent que la prise en compte des tours à contre-courant.

L'efficacité de la tour est donnée par :

$$\eta = \left(\frac{\dot{C}_e}{\dot{C}_{min}} \right) \left(\frac{T_{e\ st} - T_{e\ et}}{T_{ha\ et} - T_{e\ et}} \right) \quad (7.14)$$

où $\dot{C}_{min} = \min(\dot{m}_e c_{pe}; \dot{m}_a c_{pa}^{sat})$ et c_{pa}^{sat} est la capacité calorifique de l'air saturé à pression constante.

Cette efficacité est ensuite donnée comme une fonction du nombre d'unités de transfert (NUT) et du rapport R des débits calorifiques de l'eau et de l'air. Cette fonction dépend de la structure de la tour, selon s'il s'agit d'une tour à contre-courant ou à courants croisés :

– pour une tour à contre-courant :

si $R \leq 1$,

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-(1 - R) NUT]}{1 - R \cdot \exp[-(1 - R) NUT]} \quad (7.15)$$

sinon ($R = 1$),

$$\epsilon = \frac{NUT}{NUT + 1} \quad (7.16)$$

– pour une tour à courants croisés :

si $\dot{C}_{min} = \dot{C}_a$

$$\epsilon = \frac{1}{R} (1 - \exp(R(1 - \exp(-NUT)))) \quad (7.17)$$

sinon

$$\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{1}{R} (1 - \exp(-R.NUT))\right) \quad (7.18)$$

Le modèle TAO introduit alors une corrélation entre le nombre d'unités de transfert et le rapport des débit massiques ([Stabat, 2003]) :

$$NUT = \frac{\zeta \dot{m}_e}{\dot{C}_{min}} \left(\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a} \right)^n \frac{c_{pa}^{sat}}{c_{pa}} \quad (7.19)$$

où ζ et n sont des paramètres.

Ces deux modèles peuvent être paramétrés à l'aide des données des catalogues « constructeurs ». Le catalogue électronique de Baltimore [Baltimore] permet en effet d'extraire des points de fonctionnement des modèles proposés par ce constructeur. Des essais de paramétrage du modèle TAO ont été réalisés par [Stabat, 2003]. Ces essais ont permis de montrer la faisabilité de ce paramétrage et la précision de ce modèle sur les données « constructeurs ».

Paramétrage du modèle

Le paramétrage de ce modèle consiste à déterminer les coefficients C et n présents dans l'équation 7.19. [Stabat, 2003] précise les conditions à respecter pour obtenir un paramétrage correct à partir des données « constructeurs ». Afin de consolider cette procédure de paramétrage, nous extrayons six points de fonctionnement des données « constructeurs » au lieu des deux points théoriquement suffisants. Le résultat donné par le modèle paramétré sur les données « constructeurs » est comparé aux données mesurées sur la figure 7.9.

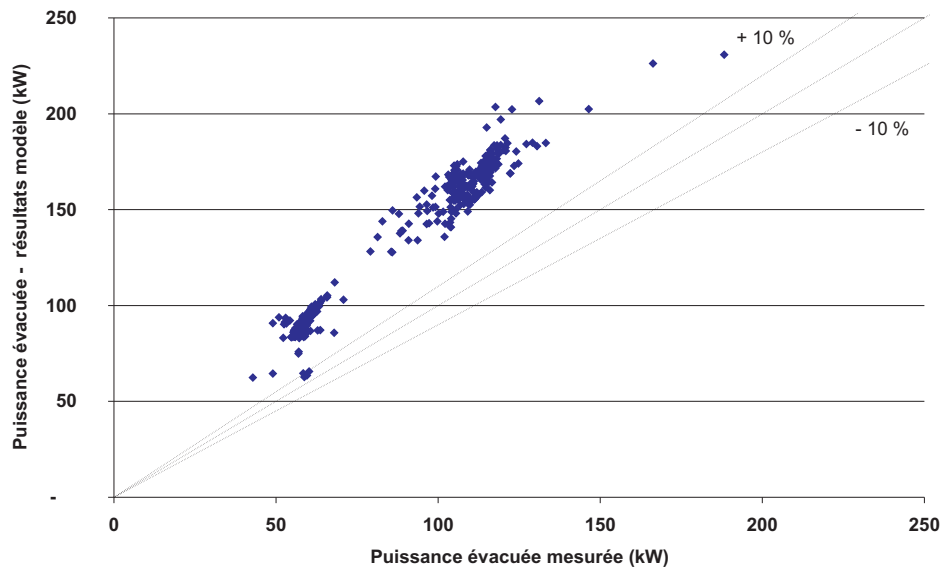


FIG. 7.9 – Comparaison des résultats donnés par le modèle TAO paramétré sur données « constructeurs ».

Comme on le distingue très nettement, le modèle TAO paramétré sur les données « constructeurs » présente un biais important de 34 %, et une erreur-type de près de 10,7 %. Ces résultats sont, bien entendu, loin d'être satisfaisants.

Afin de vérifier les performances du modèle indépendamment de la procédure de paramétrage sur les données « constructeurs », nous avons ensuite paramétré le modèle sur les points de fonctionnement mesurés. Nous obtenons alors les résultats présentés sur la figure 7.10.

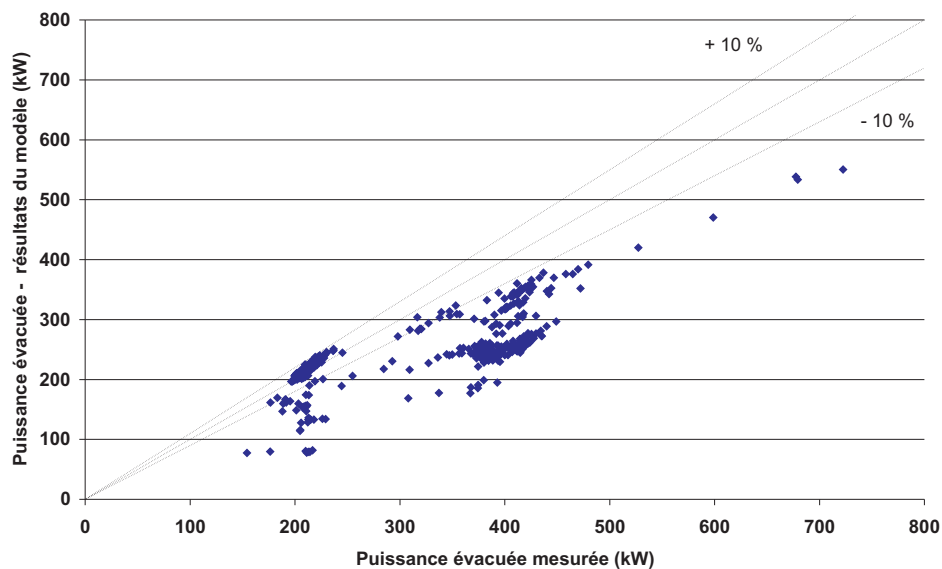


FIG. 7.10 – Comparaison des résultats donnés par le modèle TAO paramétré sur données mesurées.

Nous obtenons cette fois-ci un biais de -20 % et une erreur type de 21 %. Là encore, les

résultats du modèle TAO ne donnent pas satisfaction (l'erreur-type est même dégradée).

Modèle empirique ([Recknagel, 1986])

Description du modèle

Dans ce modèle, l'efficacité utilisée est une efficacité définie uniquement à partir des températures :

$$\eta = \frac{T_{e\ et} - T_{e\ st}}{T_{e\ et} - T_{ha\ et}} \quad (7.20)$$

Cette efficacité est également donnée par la relation, obtenue de manière tout à fait empirique :

$$\eta = C_t (1 - e^{-\lambda}) \quad (7.21)$$

où

- C_t est la caractéristique de la tour ;
- λ est le rapport de deux débits d'air relatifs au débit d'eau I_0 et I_{min} .

Dans une tour de refroidissement idéale, $\dot{m}_{a\ min}$ est le débit d'air minimal nécessaire au refroidissement d'un certain débit d'eau \dot{m}_e de la température $T_{e\ et}$ à la température $T_{e\ st}$. Ce débit est obtenu par lecture sur un abaque avec comme entrées $T_{e\ et}$ et $T_{ha\ et}$ (cf. figure 7.11).

I_{min} s'écrit donc :

$$I_{min} = \frac{\dot{m}_{a\ min}}{\dot{m}_e} \quad (7.22)$$

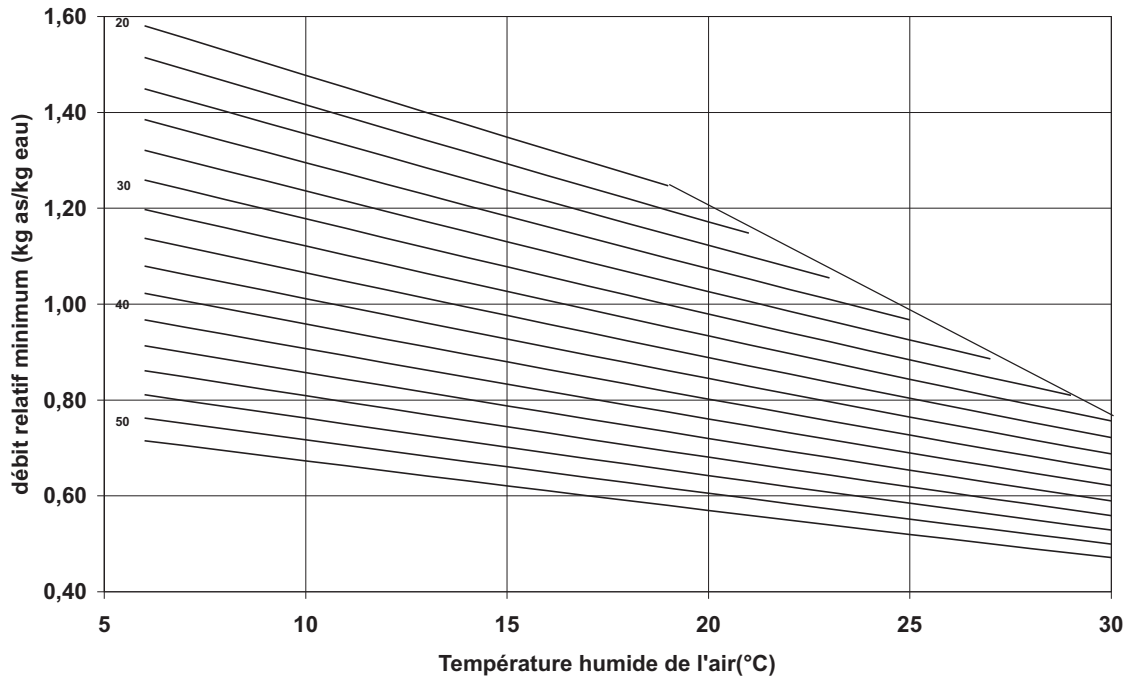


FIG. 7.11 – Abaque pour la détermination du débit d'air relatif minimum ([Recknagel, 1986]).

Enfin, I_0 est le débit d'air relatif effectivement nécessaire, c'est-à-dire le rapport entre le débit d'air et le débit d'eau qui traversent la tour :

$$I_0 = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_e} \quad (7.23)$$

Paramétrage

Nous procédons de la même manière pour tester le modèle « Recknagel », en utilisant les mêmes données « constructeurs ». Les résultats donnés par le modèle paramétré sur les données « constructeur » sont comparées aux données mesurées sur la figure 7.12

Le modèle Recknagel paramétré sur les données « constructeurs » présente un biais de 23,8 % et une erreur-type de 6,6 %. Le biais de ce modèle est encore trop important pour que ce modèle soit considéré valable pour l'évaluation des performances de tours de refroidissement humide dans le cadre d'un protocole d'évaluation.

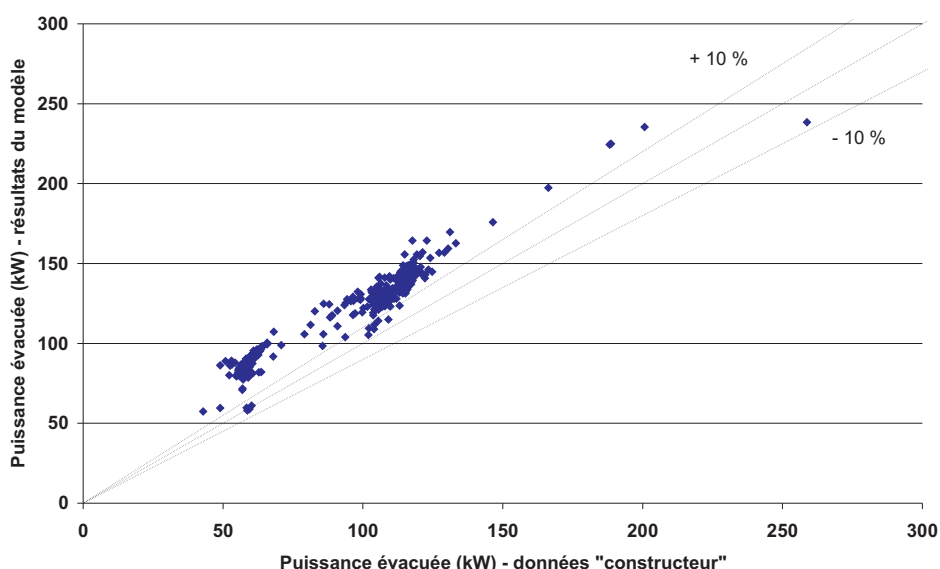


FIG. 7.12 – Comparaison des résultats donnés par le modèle « Recknagel » paramétré sur données « constructeurs ».

Pourtant, si nous paramétrons ce modèle sur les données mesurées, nous obtenons des résultats tout à fait satisfaisants (figure 7.13) : le biais du modèle est de -1,7 % et l'erreur-type de 10,78 %, ce qui permet de satisfaire le critères d'exactitude attendus des relations explicatives dans le cadre d'un protocole d'évaluation.

Au stade actuel de nos travaux, nous ne sommes pas en mesure de conclure sur cette constatation, principalement parce que nous ne disposons que d'une seule série de mesures. Nous considérons qu'il faudrait renouveler l'expérimentation de tours de refroidissement pour nourrir notre analyse et confronter ces mesures aux données issues du catalogue électronique dont nous avons extraits les points de fonctionnement « constructeurs ».

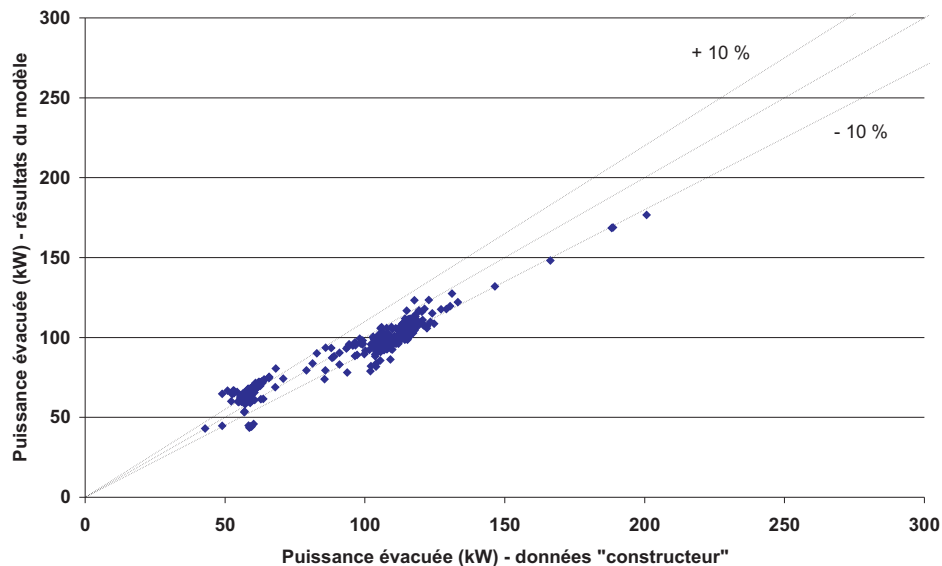


FIG. 7.13 – Comparaison des résultats donnés par le modèle « Recknagel » paramétré sur données mesurées.

A défaut de points de fonctionnement, [Recknagel, 1986] propose des valeurs par défaut de constante de la tour (cf. tableau 7.13).

Hauteur de la couche de corps de remplissage, en m	Constante C_t
0,3	0,65
0,5	0,81
0,7	0,93
0,9	1,00

TAB. 7.13 – Valeurs par défaut de la constante C_t pour le paramétrage du modèle de tour de refroidissement humide ouverte « Recknagel » (d’après [Recknagel, 1986])

Synthèse sur les modèles de tour de refroidissement

Les résultats obtenus par le modèle TAO, testé pour la première fois sur des données mesurées, ne nous ont pas convaincus d’utiliser ce modèle pour l’évaluation des performances thermiques des tours de refroidissement. En revanche, le modèle « Recknagel » a montré de meilleures dispositions à remplir cet objectif.

Le modèle « Recknagel » permet donc de rendre compte des performances des tours de refroidissement à charge partielle comme nous venons de l’illustrer, à condition de disposer de quelques points de mesures pour paramétrer le modèle. Ces points de fonctionnement peuvent être obtenus à l’aide du protocole de mesure décrits dans le chapitre 6, et que nous avons nous-mêmes testé sur site pour obtenir les mesures présentées dans ce paragraphe. Une période de mesures d’une demi-journée est amplement suffisante pour obtenir les données nécessaires au paramétrage du modèle « Recknagel ».

De plus, les valeurs par défaut proposées par la littérature permettent de représenter le comportement de tours de refroidissement humides ouvertes dans les protocoles d'évaluation sans avoir recours à la mesure systématique de leurs performances.

Si ce modèle représente correctement les performances thermiques d'une tour de refroidissement ne permet toutefois pas d'accéder directement aux performances énergétiques de celles-ci. A partir de la donnée d'un point de fonctionnement (puissance à évacuer, température d'eau en entrée et en sortie, température d'air humide), le modèle « Recknagel » peut déterminer le débit d'air nécessaire pour atteindre ce point de fonctionnement.

Pour atteindre la puissance électrique absorbée par les ventilateurs de la tour, nous reprenons l'hypothèse que cette puissance est directement proportionnelle au débit d'air traversant la tour (cf. [Stabat, 2003]). Cependant, de nombreuses tours sont équipées de plusieurs ventilateurs, ce qui autorise le fractionnement du débit d'air traversant par le démarrage progressif des ventilateurs. Les modèles de tour permettent donc de calculer pour chaque point de fonctionnement le débit d'air traversant la tour utile au refroidissement. Nous calculons donc la puissance électrique consommée par la tour en supposant que le rapport de la puissance électrique absorbée à la puissance nominale est égal au rapport du débit d'air utile au débit d'air nominal.

7.4 Analyse du plan de fonctionnement des installations de production frigorifique

Lorsqu'une installation de production d'énergie frigorifique est composée de plusieurs groupes frigorifiques, on met en place un plan de fonctionnement de l'installation dans lequel l'ordre de démarrage des groupes est spécifié. Cette mise en cascade des groupes frigorifiques permet d'adapter le nombre de machines mises en marche à la demande d'énergie frigorifique.

Grâce à l'observation de mesures réalisées pendant une semaine sur une installation composée de cinq groupes de production d'eau glacée, exploitée par Elyo, nous avons mis en évidence graphiquement le plan de fonctionnement de l'installation.

La figure 7.14 représente la puissance électrique absorbée par chacun des groupes en fonction de la demande énergétique de l'installation. On peut y distinguer assez clairement l'ordre de démarrage des groupes de production d'eau glacée : les groupes 1 et 5 sont les premiers démarrés (ils sont en marche quasiment sur toute la période d'observation), puis viennent dans l'ordre les groupes 2, 3 et 4.

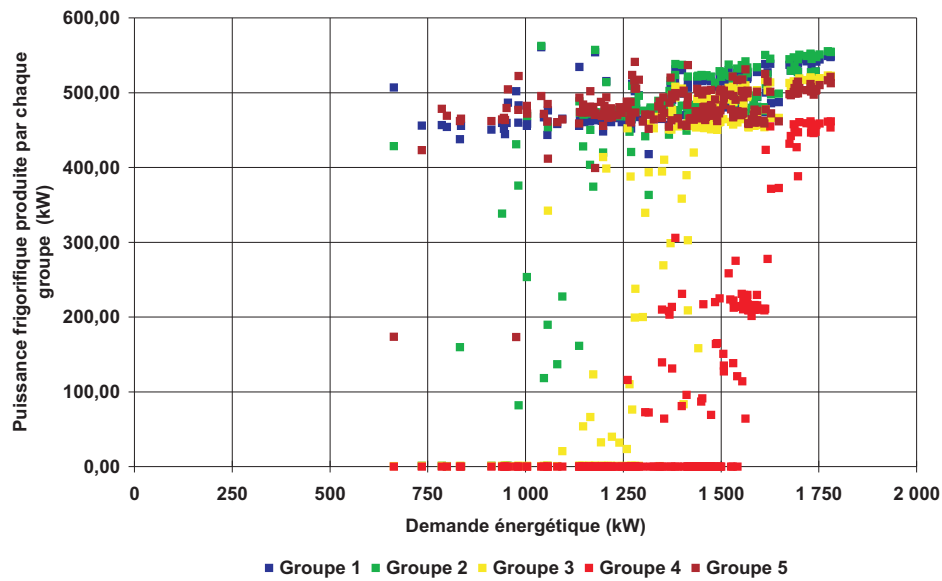


FIG. 7.14 – Mise en évidence de l'ordre de démarrage de groupes de production d'eau glacée.

L'observation que nous venons de faire peut être précisée par l'observation de l'évolution des puissances frigorifiques cumulées dans le temps (figure 7.15). Cette figure nous permet de lire directement les niveaux de puissance appelée qui détermine le démarrage des groupes.

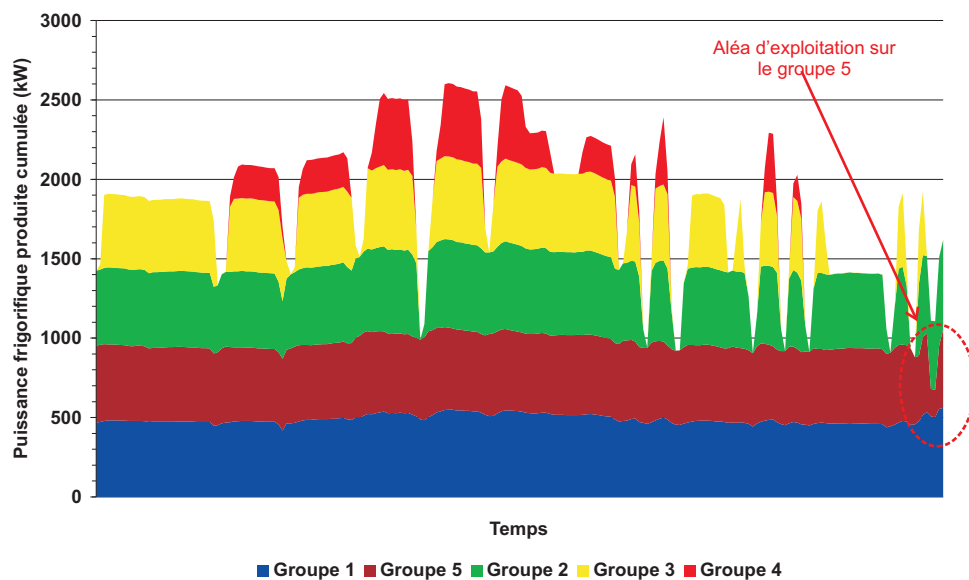


FIG. 7.15 – Mise en évidence des niveaux de puissance appelée déclenchant le démarrage des groupes de production d'eau glacée.

Nous déduisons de l'observation de la figure 7.15, le niveau de puissance frigorifique qui conditionne le démarrage de chaque groupe :

- groupe 1 : démarrage à 0 kW ;
- groupe 5 : démarrage vers 500 kW ;
- groupe 2 : démarrage vers 950 kW ;
- groupe 3 : démarrage vers 1 400 kW ;
- groupe 4 : démarrage vers 1 900 kW .

Ces niveaux de puissance ne sont évidemment que des valeurs approchées, mais qui représentent bien le plan de fonctionnement de l'installation. Nous avons donc traduit ces observations en algorithme pour simuler le démarrage des groupes. Cet algorithme distribue la charge frigorifique demandée par le bâtiment entre les différents groupes de production d'eau glacée, en suivant l'ordre de démarrage spécifié dans le plan de fonctionnement. De cette manière, nous pouvons caractériser le comportement du système évalué, composé de l'ensemble de groupes de production d'eau glacée. Nous sommes donc en mesure d'ajuster les consommations d'énergie de la cascade de groupes de production d'eau glacée avant et après amélioration d'un des groupes.

Cependant, sur site, le démarrage d'un groupe est conditionné par des contraintes d'exploitation et de maintenance. Ainsi, sur la droite de figure 7.15, on peut voir que le groupe 5 ne produit plus la puissance frigorifique attendue et fonctionne à puissance réduite, ce qui provoque un démarrage précoce du groupe 3. Le plan de fonctionnement est donc soumis à des aléas d'exploitation : il peut s'agir d'un arrêt de groupe pour maintenance ou réparation ou d'un arrêt soudain de mise en sécurité d'un groupe de production d'eau glacée. Nous précisons donc que le plan de fonctionnement que nous avons identifié et reproduit est susceptible d'être modifié, au besoin, par les exploitants de l'installation : notre représentation algorithmique de ce plan de fonctionnement ne correspond donc à la réalité que sur une période de fonctionnement de marche « normale ».

7.5 Calcul des économies d'énergie

Assemblage des relations explicatives

Les différents protocoles de mesures et les traitements des données associés que nous avons décrits dans ce chapitre permettent de déterminer, sur les périodes d'évaluation, tous les éléments nécessaires à l'évaluation des performances de chaque équipement qui compose une installation de production d'eau glacée . Nous assemblons ces éléments de manière à construire l'algorithme permettant d'évaluer la performance globale de l'installation.

Chaque groupe de production d'eau glacée est représenté par une relation reliant la puissance électrique absorbée, la puissance frigorifique, et les températures de l'eau en entrée du condenseur et sortie de l'évaporateur (cf. figure 7.16).

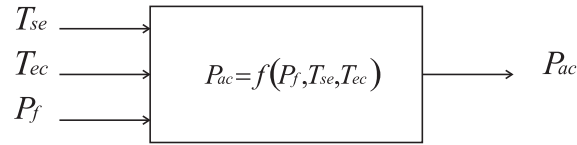


FIG. 7.16 – Représentation synoptique des relations explicatives des performances de groupes de production d'eau glacée.

Nous assemblons donc les relations explicatives des différents groupes pour représenter le fonctionnement de l'ensemble des groupes de production d'eau glacée. L'algorithme représentant le plan de fonctionnement ordonne le démarrage des groupes et distribue la puissance frigorifique que chaque groupe doit fournir.

De la même façon que pour les groupes de production d'eau glacée, chaque tour de refroidissement est représentée par une relation reliant les différentes grandeurs représentées sur la figure 7.17 :

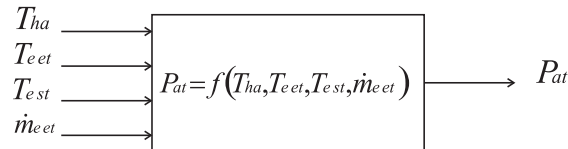


FIG. 7.17 – Représentation synoptique des relations explicatives des performances de tours de refroidissement.

Nous assemblons ces relations explicatives avec un algorithme représentant le plan de fonctionnement des tours. Ce plan de fonctionnement doit ordonner le démarrage des ventilateurs des tours en fonction de la quantité de chaleur à évacuer. Or cette quantité de chaleur est fonction des performances des groupes de production d'eau glacée, laquelle performance dépend de la température de l'eau en entrée des condenseurs, que l'on suppose égale à la température d'eau en sortie des tours de refroidissement.

Nous faisons apparaître la nécessité de mettre en place un calcul itératif³ entre les deux ensembles composés respectivement des groupes de production d'eau glacée et des tours de refroidissement (cf. figure 7.18).

³La méthodologie de calcul a été développée dans le cadre de la convention de recherche mise en place entre Elyo Cynergie et le Centre Energétique et Procédés. La description précise des étapes de calcul reste donc confidentielle. Néanmoins, nous en présentons les grandes lignes dans ce document

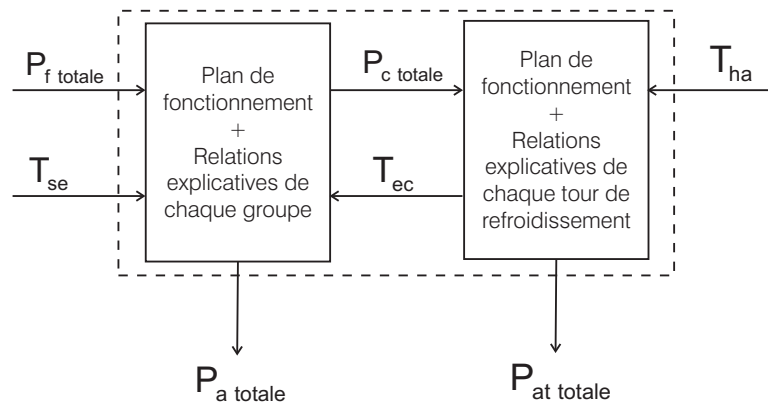


FIG. 7.18 – Représentation synoptique de la procédure de calcul des performances énergétiques d'une installation de production d'eau glacée.

Cette assemblage des relations explicatives nous permet de reconstituer le fonctionnement de l'installation de production d'eau glacée. Sur la figure 7.19, on peut ainsi observer la reconstitution de la cascade de groupes frigorifiques (graphique du bas) et la comparer avec les données mesurées (graphique du haut). Comme nous l'avons signalé au paragraphe 7.4, la reproduction du plan de fonctionnement est valide tant qu'aucun aléa ne vient imposer des changements d'exploitation.

Ainsi, nous n'avons pas pu représenter le fonctionnement à puissance réduite du groupe 5 à la fin de la période représentée sur ces figures. Dans l'exemple présenté sur la figure 7.19, c'est la description des conditions de fonctionnement qui nous manque pour pouvoir reproduire fidèlement le comportement de l'ensemble de l'installation. Toutefois, nous disposons bien de la relation explicative (algorithme de répartition de la charge frigorifique) qui nous permet réaliser les ajustements nécessaires pour le calcul des économies d'énergie.

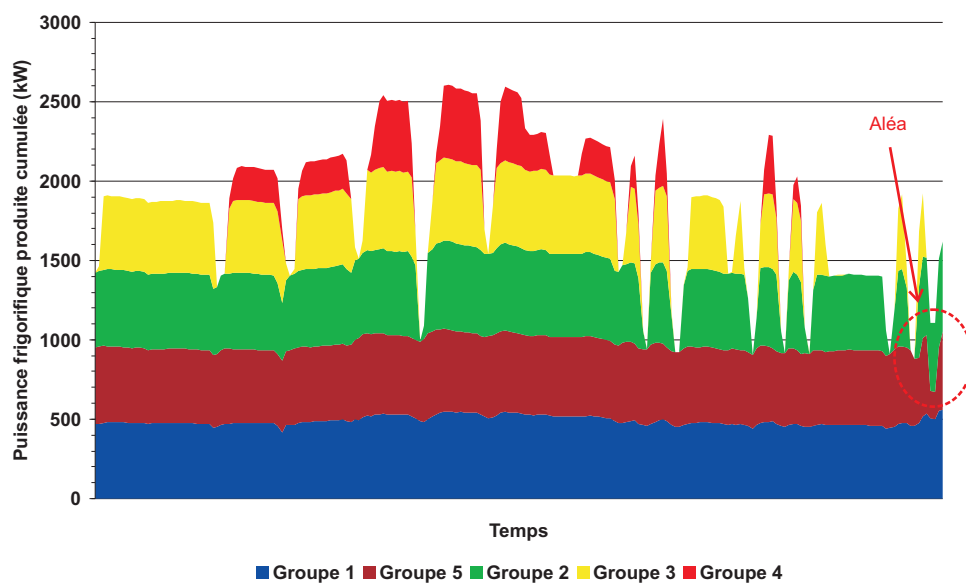


Illustration de la cascade de groupes de production d'eau glacée - Données mesurées

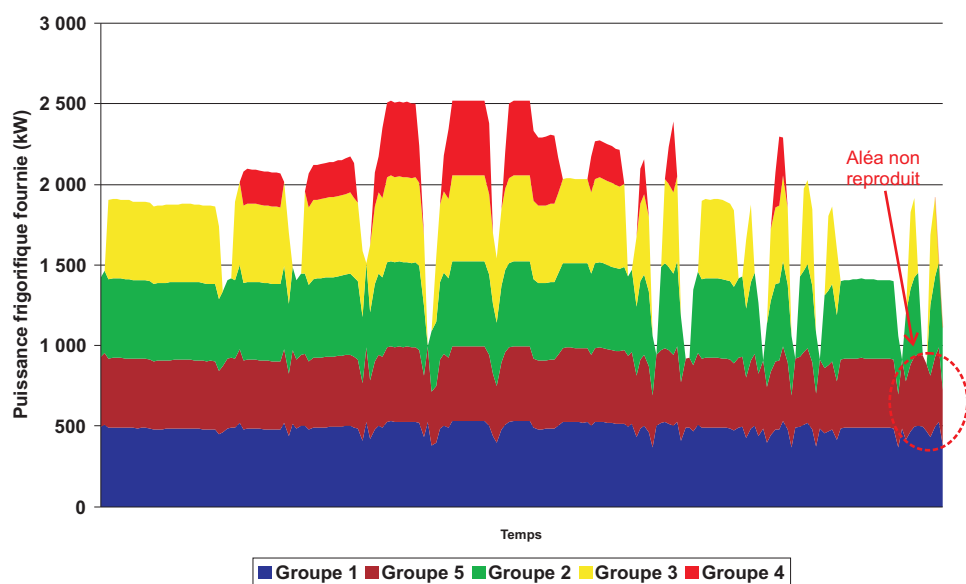


Illustration de la cascade de groupes de production d'eau glacée - Données simulées

FIG. 7.19 – Reconstitution du fonctionnement d'une installation de production d'eau glacée - Illustration du fonctionnement en cascade.

Choix de la méthode de calcul

Nous avons présenté au chapitre 5.1, les deux méthodes de calcul des économies d'énergie utilisables dans le cadre d'un protocole d'évaluation des économies d'énergie. La méthode des « consommations évitées » repose sur un ajustement des consommations de la période de référence aux conditions de fonctionnement de la période de suivi. Ceci suppose d'être capable d'observer toutes les conditions de fonctionnement et en particulier, de reproduire fidèlement le plan de fonctionnement, jour par jour, en relevant les modifications de ce plan dues aux aléas d'exploitation. Or, nous venons d'observer un exemple où cette reproduction fidèle n'a pas pu être réalisée.

A défaut de pouvoir recenser tous les aléas d'exploitation et les modifications du plan de fonctionnement qu'ils engendrent, nous proposons de réaliser le calcul des économies d'énergie à l'aide d'un plan de fonctionnement « sans aléas » sur les deux périodes d'évaluation. Le calcul peut être affiné en introduisant plusieurs stratégies de gestion correspondant à différentes phases d'exploitation typiques du site ou du bâtiment : un exploitant peut décider, au cours de l'année, de modifier la séquence de démarrage des groupes de production d'eau glacée en fonction de la saison, ou de la production d'énergie moyenne sur la journée. Par ailleurs, nous conservons les autres données réelles des conditions de fonctionnement (température extérieure, demande énergétique).

Enfin, en ce qui concerne le choix des conditions de fonctionnement qui vont servir à l'ajustement des consommations, deux séries d'observations sont disponibles :

- **les observations de la période de référence** : cela suppose que le bâtiment a été instrumenté pendant un an (période minimale pour l'observation du climat). Par conséquent, la réalisation de l'amélioration est ajournée d'une année, le temps de réaliser ces mesures indispensables à l'évaluation des économies d'énergie. Cependant, avec cette méthode, l'ajustement des consommations peut être réalisé au fur et à mesure, quasiment en temps réel, ce qui a de nombreux avantages. Du point de vue contractuel, cela permet de mensualiser la rémunération du contrat sur une indexation précise des performances. D'autre part, cette méthode peut également servir pour la réalisation du suivi des performances des installations dès la première année.
- **les observations de la période de suivi** : cette solution présente l'avantage de pouvoir mettre en œuvre sans délai l'amélioration de la performance énergétique. En revanche, il faut attendre un an avant de pouvoir réaliser les premiers ajustements.

Il nous paraît plus vertueux de privilégier la deuxième méthode, car elle permet d'engager sans attendre la réalisation des améliorations de la performance énergétique des installations. Cela n'empêche pas une rémunération du prestataire au forfait sur la première année et une régularisation des prestations dès que les ajustements peuvent être réalisés. De cette façon, le calcul aboutit au volume de *consommations d'énergie évitées corrigées des aléas d'exploitation*.

Bilan

Evaluation des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée

A partir de l'analyse des principes des protocoles d'évaluation détaillée dans le chapitre 5), nous avons établi les éléments permettant de construire un protocole d'évaluation des améliorations sur les installations de production d'eau glacée dans les chapitres 6 et 7.

Le périmètre de ce protocole comprend tous les groupes de production d'eau glacée. Ainsi, les interactions entre les différents groupes sont prises en compte dans l'évaluation des consommations de l'installation. Nous avons, dans le même temps, clairement identifié les effets interactifs entre les améliorations portées sur les groupes de production d'eau glacée et les consommations d'énergie des tours de refroidissement.

A partir de là, nous avons mis en place des modèles permettant de caractériser le comportement de ces équipements dans le but de pouvoir ajuster les consommations d'énergie de l'installation en fonction des caractéristiques de la demande énergétique et de l'environnement (température de l'air humide) sur chaque période d'évaluation. L'utilisation de ces modèles requiert de les paramétrer, a priori sur la base de points de fonctionnement des équipements. Mais nous avons démontré qu'il était possible d'utiliser également les données « constructeurs » ou éventuellement des données par défaut pour réaliser ce paramétrage.

En parallèle, un protocole de mesures a été décrit et mis en œuvre dans le but de paramétrer ces différents modèles. Une partie de ce protocole de mesures doit permettre d'observer les caractéristiques des périodes d'évaluation de manière à pouvoir réaliser les ajustements de consommations.

Les limites de ce protocole de mesures ont été établies. D'une part, nous ne sommes pas en mesure de forcer le fonctionnement des installations en exploitation, ce qui ne nous permet pas toujours de caractériser tous les modes de fonctionnement des groupes de production d'eau glacée. D'autre part, la mise en œuvre de ce protocole de mesures demande le plus grand soin, notamment en ce qui concerne l'utilisation du débitmètre à ultrasons. Nous avons pu, entre autres, détecter des anomalies dans les résultats des mesures sans pouvoir en identifier l'origine. L'interprétation de ces anomalies n'entre a priori pas dans la démarche d'un protocole d'évaluation, mais s'inscrit davantage dans une démarche d'audit préalable à la mise en place d'un contrat de performance. Un audit énergétique des installations permettrait donc d'identifier l'origine des défauts (cf. [Bory, 2008]) ou

d'invalider les résultats des mesures réalisées.

Nous résumons dans le tableau 7.14 les stratégies identifiées pour la détermination des relations explicatives des performances des équipements.

	Groupe de production d'eau glacée		Tour de refroidissement humide ouverte
	Pleine charge	Charge partielle	
Mesures	mode de fonctionnement pas toujours observable	oui	oui
Données « constructeurs »	dépend des constructeurs	oui, à partir de l' <i>ESEER</i>	pas concluant
Valeurs par défaut	oui	non	oui

TAB. 7.14 – Origine des données pouvant servir au paramétrage des modèles de groupes de production d'eau glacée et de tour de refroidissement.

Afin, dans le but de réaliser les ajustements des consommations d'énergie nécessaires à la comparaison des consommations avant et après réalisation, la demande énergétique et la température extérieure seront relevées durant les périodes d'évaluation. Nous avançons cependant qu'il n'est pas indispensable d'effectuer ce relevé sur la période de référence, avant la réalisation des améliorations, dès lors que les modèles de représentation du comportement des équipements sont paramétrés.

En effet, afin de permettre la réalisation des améliorations au plus tôt, nous recommandons d'utiliser les conditions de fonctionnement de la période de suivi pour réaliser les ajustements de consommation. Ainsi, les économies d'énergie calculées correspondront aux consommations d'énergie réellement évitées, aux aléas de fonctionnement près (cf. paragraphe 7.5).

Chapitre 8

Intégration des améliorations des performances énergétiques des installations de production d'eau glacée dans les systèmes de certificats d'économie d'énergie

La directive européenne relative à l'efficacité énergétique ([Directive 2006/32]) met en avant un ensemble d'outils de politique publique en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la gestion de la demande. Parmi ces outils, les certificats d'économie d'énergie, appelés également « certificats blancs », figurent en bonne place comme outil recommandé pour la gestion de la demande en énergie. Cette directive donne une définition plutôt large de ces certificats blancs en les présentant comme « des certificats délivrés par des organismes de certification indépendants confirmant les affirmations des acteurs du marché concernant des économies d'énergie consécutives à la mise en œuvre de mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique ».

En France, c'est la loi de programmation et d'orientation de la politique énergétique du 13 juillet 2005 ([Loi POPE, 2005]) qui définit les bases et principes du dispositif français de certificats d'économie d'énergie. De la même manière, l'Italie et la Grande-Bretagne ont mis en place un dispositif semblable sur leur territoire (cf. [Voogt, 2007]). Ce dispositif consiste à imposer une obligation, sur une période donnée, de réalisation d'économies d'énergie à un ensemble d'acteurs, lesquels sont, la plupart du temps, les fournisseurs d'énergie (France et Grande-Bretagne) ou les distributeurs d'énergie (Italie). Ces acteurs doivent réaliser une série d'actions au choix parmi un panier d'actions, appelées « actions éligibles », proposées la plupart du temps par le législateur.

Nous avons voulu savoir si les améliorations réalisées sur les installations de production d'eau glacée que nous avons décrites dans la deuxième partie de ce document, pourraient être prises en compte dans un système de certificats blancs, et en particulier dans le système français. Nous allons donc commencer par analyser les systèmes de certificats blancs pour déterminer les caractéristiques des actions éligibles de ces systèmes. Dans un second temps, dans le but de proposer des solutions pour la prise en compte des améliorations

réalisées sur les installations de production frigorifique, nous verrons de quelle manière le protocole d'évaluation décrit au chapitre 7 peut être adapté et apporter des éléments de réponse à cette problématique.

Pour mener à bien cette analyse, nous nous appuyons en grande partie sur les résultats que nous avons établis dans le cadre du projet de recherche EuroWhiteCert¹ auquel a pris part le Centre Énergétique et Procédés de l'Ecole des Mines de Paris. Ce projet de recherche, porté par la Direction Énergie et Transport de la Commission Européenne, visait à formuler des recommandations pour la mise en œuvre d'un système européen de certificats d'économie d'énergie.

8.1 Principes des systèmes de certificats d'économie d'énergie

8.1.1 Les instruments de politique publique pour l'amélioration de l'efficacité énergétique

Les pouvoirs publics disposent de plusieurs types d'instruments pour favoriser l'amélioration de l'efficacité énergétique. Chaque instrument possède des avantages et des inconvénients (cf. [Moisan, 2004]).

La **réglementation** permet d'exclure des équipements neufs qui ne satisfont pas un niveau minimum de performance énergétique. Il s'agit d'un instrument efficace mais qui n'agit que sur les équipements existants. Il est en effet excessivement coûteux et parfois impossible d'imposer aux consommateurs d'ajuster continuellement leurs équipements au niveau de la réglementation. De plus, la réglementation est un instrument qui impose un niveau minimum, mais qui présente l'inconvénient de ne pas favoriser l'innovation.

Les **labels** permettent d'orienter les choix des consommateurs en signalant les produits les plus performants et en leur apportant une information sur l'efficacité énergétique. On peut citer l'exemple des « étiquettes énergies » sur les appareils électroménagers ou sur les voitures. De manière plus générale, l'**information des consommateurs** est également un instrument important compte tenu de la très faible connaissance qu'ont les ménages de leurs consommations énergétiques et des gains financiers qu'ils pourraient réaliser. Il est généralement très difficile pour un consommateur de savoir quel coût imputer à chaque usage et notamment en ce qui concerne la consommation d'électricité. Généralement, la transformation des comportements des consommateurs par cet instrument est relativement lente.

Les **incitations fiscales** et les **subventions** permettent également d'inciter le consommateur à choisir les techniques les plus performantes. On reproche toutefois souvent à ces instruments financiers ou fiscaux d'orienter le choix des acheteurs une fois que la décision d'acheter est prise, alors que l'un des buts recherchés est de déclencher la décision d'investir. Les économistes parlent alors d'« effet d'aubaine » : le montant de la subvention profite alors à des acteurs qui auraient de toute façon investi. On reproche également au

¹Site Internet du projet : www.eurowhitecert.org

mécanisme de subvention de provenir du budget de l'Etat : c'est donc le contribuable qui finance l'amélioration de la performance énergétique des consommateurs.

Enfin, la **fiscalité** sur l'énergie constitue un signal pour le consommateur, qui est davantage incité à investir dans un appareil performant ou à anticiper un renouvellement d'équipement. Les taxes sont connues pour être un instrument efficace pour modifier les comportements des consommateurs. Elles comportent néanmoins deux inconvénients. Le premier est lié à son acceptabilité par le contribuable-consommateur. Le second vient de la difficulté pour le régulateur à paramétrer correctement le niveau du signal fiscal : l'incertitude sur la réponse du consommateur est relativement importante.

L'expérience montre que ces outils exploitent mal les potentiels d'économies d'énergie principalement dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Outre le caractère diffus de ce potentiel, le secteur résidentiel et tertiaire comporte certaines particularités notamment dans le fait, que dans de nombreux cas, le propriétaire du bien et son consommateur (utilisateur ou occupant) sont deux agents économiques distincts. Dans ces cas-là, l'acteur susceptible de consentir un investissement dans une technologie efficace n'en est pas nécessairement le bénéficiaire. Les mécanismes incitatifs à l'investissement ne peuvent donc pas atteindre leur cible.

Pour ces raisons, il fallait trouver un instrument susceptible de récompenser ceux qui investissent dans la diminution des charges énergétiques des consommateurs, au-delà des incitations existantes, sans bénéficier directement de la diminution des charges énergétiques. C'est sur ce principe qu'ont été mis en place les systèmes de certificats d'économie d'énergie.

8.1.2 Une obligation de réalisation d'économies d'énergie

Les systèmes de certificats d'économie d'énergie reposent sur une obligation imposée à des acteurs, appelés « obligés », à réaliser un volume d'économie d'énergie pendant une période donnée (typiquement trois ans). En France, ces obligés doivent réaliser ou faire réaliser des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique. L'acteur qui réalise l'action reçoit de la part de l'autorité régulatrice un montant de certificats, correspondant à une attestation de la réalisation d'une amélioration génératrice d'économies d'énergie. A la fin de chaque période, les obligés doivent remettre au régulateur un montant de certificats équivalent à leur obligation, sans quoi, il devront s'acquitter du paiement d'une pénalité (libératoire ou non).

En France, ce sont les fournisseurs d'électricité, de gaz, de fioul domestique, de chaleur et de froid par réseau qui sont visés par l'obligation. Cependant, le dispositif français est ouvert à d'autres acteurs, dénommés « acteurs éligibles » (entreprises, collectivités territoriales) qui peuvent demander à recevoir des certificats d'économie d'énergie pour la réalisation d'actions d'amélioration sur leur patrimoine (ou chez des tiers pour les collectivités territoriales). De manière générale, l'investisseur est la personne morale éligible aux certificats d'économie d'énergie, c'est-à-dire qu'il est le bénéficiaire du montant de certificats correspondant à l'action engagée.

8.1.3 Un mécanisme de flexibilité : l'échange de certificats

L'obligation imposée aux obligés doit les inciter à réaliser, en premier lieu, les actions d'amélioration à moindre coût. Cependant, tous les obligés ne sont pas en prise directe avec des potentiels d'économie d'énergie de même nature. Aussi, de la même manière que pour les crédits-carbone ([Gaudioso, 2007]), les détenteurs de certificats d'économie d'énergie sont autorisés à les vendre ou à en acheter auprès d'un détenteur excédentaire, soit par l'intermédiaire d'un marché (France, Italie), soit obligatoirement de gré à gré entre détenteurs (Grande-Bretagne). L'objectif de ce mécanisme de flexibilité est de minimiser le coût global de réalisation des économies d'énergie. L'idée est que les obligés ayant accès aux économies d'énergie les moins chères soient globalement vendeurs de certificats, tandis que les obligés ayant accès aux économies les plus chères soient globalement acheteurs de certificats.

Les études réalisées sur la possibilité d'émergence d'un marché de certificats blancs européen, à l'image du système d'échange de quotas CO_2 européens, ont montré qu'il ne fallait toutefois pas s'attendre à la naissance d'un marché mature à court terme ([Adnot, 2007b], [Duplessis, 2007] et [Mundaca, 2008]). L'une des principales raisons de la faible éventualité de l'émergence d'un tel marché est l'intérêt prononcé par les obligés à profiter de l'obligation qui leur est imposée pour renforcer les liens commerciaux avec leurs clients. Ceci pousse naturellement les fournisseurs d'énergie à réaliser des actions par eux-mêmes directement chez leurs clients plutôt qu'à chercher à acquérir les montants de certificats équivalents par ailleurs.

A titre, d'illustration, on notera qu'en France, au 1^{er} septembre 2008, le montant total de certificats délivrés était de $25 TWh_{cumac}$ ², mais que dans le même temps, environ $40 GWh_{cumac}$ seulement ont été échangés pour un montant moyen³ de $0,30 \text{ c€}/kWh_{cumac}$.

8.2 Emission des certificats d'économie d'énergie

8.2.1 Objectifs de la certification

Le certificat d'économie d'énergie est l'objet attribué par le régulateur pour la réalisation d'un projet d'amélioration. Son montant repose sur une méthode de calcul des économies d'énergie générées par un projet donné, certifiée par le régulateur. En principe, le certificat d'économie d'énergie représente un montant d'économie d'énergie généré tout au long de la vie de l'amélioration. Ce montant, déterminé par une méthode validée par le régulateur, peut être exprimé en énergie finale ou en énergie primaire.

La certification des économies donne une valeur supplémentaire au projet d'amélioration grâce à la création d'un bien meuble supplémentaire : le certificat. Notons que la valeur du certificat est ambivalente. D'une part, il est valorisable financièrement pour

²le kWh_{cumac} est l'unité du certificat d'économie d'énergie français, dont le montant est égal à la somme actualisée des économies d'énergie générées sur la durée de vie de l'amélioration (« cumac » signifie « cumulé et actualisé »). Le taux d'actualisation retenu est de 4 %.

³La cotation mensuelle des certificats d'économie d'énergie français est visible à l'adresse : <https://www.emmy.fr/front/cotation.jsf>

son détenteur, au même titre que tout droit de propriété en tant que bien meuble négociable sur un marché d'échange. D'autre part, *son existence-même rend tangible l'absence de consommations* et permet de révéler l'existence d'économies d'énergie aux yeux des consommateurs ou des acteurs les moins informés.

8.2.2 Méthodes de certification

Dans le cadre du projet EuroWhiteCert, nous avons mis en évidence les critères que devrait satisfaire une procédure de certification des économies d'énergie de manière à s'intégrer efficacement à un système de certificats blancs ([Adnot, 2007a]). Ces procédures de certification ne doivent pas augmenter sensiblement les coûts de transaction associés à la réalisation du projet, et doivent même contribuer à les réduire.

En effet, *l'émission de certificats doit être réalisée au coût le plus bas*, de manière à déclencher l'investissement plus rapidement qu'en l'absence de certificats. On notera que ces coûts de transaction peuvent représenter entre 13 et 28% du montant de l'investissement pour un particulier selon [Björkqvist, 1993], tandis que [Hein, 1995] les estime à environ 10% pour de grandes entreprises. Il s'agit donc de coûts non négligeables.

Méthodes de certification ex-ante

Une manière de réduire au maximum les coûts de transaction est de disposer de **méthodes de certification ex-ante** : les opérations nécessaires à la certification sont effectuées avant ou au même moment que la réalisation du projet d'amélioration. Ces méthodes permettent l'émission de certificats au même moment qu'est réalisé l'investissement et contribuent à lever une partie des barrières à l'investissement. Elles permettent, par ailleurs, de supprimer le risque de non-certification des économies pour l'investisseur, et minimisent le coût de certification en réduisant les moyens nécessaires à l'émission des certificats. C'est le principe adopté par le système français : les certificats sont attribués au forfait sur la base de quelques critères permettant de caractériser l'impact des améliorations.

Les méthodes de certification ex-ante reposent sur la déclaration de quelques paramètres caractéristiques de l'amélioration. A titre d'exemple, nous présentons la méthode d'émissions de certificats correspondant à l'installation d'une chaudière à condensation dans un immeuble tertiaire (cf. [Arrêté du 19 juin 2006]). Les données nécessaires à la détermination du montant de certificats d'économie d'énergie sont :

- l'usage du bâtiment : bureaux, commerces, enseignement, hôtellerie-restauration ou santé ;
- la surface chauffée du bâtiment en m^2 ;
- l'usage de la chaudière : chauffage seul ou chauffage et eau chaude sanitaire ;
- la catégorie de puissance de la chaudière : inférieure strictement ou supérieure à 30 kW ;
- la zone climatique réglementaire de l'immeuble (cf. [Méthode Th-C-E, 2005]).

A partir de ces paramètres, le montant de kWh_{cumac} pour l'installation d'une chaudière à condensation dans un immeuble tertiaire est déterminé grâce aux données de la figure 8.1.

Montant unitaire en kWh cumac / m ²				x	Surface chauffée en m ²	x	Branche	Facteur d'occupation
Usage de la chaudière	Zone climatique	Puissance de la chaudière en kW						
		< 30 kW	≥ 30 kW					
Chauffage	H1	770	930		S		Bureaux	1,1
	H2	630	760				Enseignement	0,8
	H3	420	510				Commerces	1,1
Chauffage et eau chaude sanitaire	H1	860	1 000				Hôtellerie – Restauration	1,4
	H2	720	860				Santé	0,9
	H3	500	610					

FIG. 8.1 – Méthode de calcul du montant de kWh_{cumac} pour l'installation d'une chaudière à condensation dans un immeuble tertiaire (fiche BAT-Th-02 dans [Arrêté du 19 juin 2006]).

Ces méthodes de certification sont donc très bien adaptées à l'émission de certificats de projets de taille modeste, reproductibles en grand nombre. La **standardisation** des méthodes permet de maîtriser les coûts de transactions liés à l'émission de certificats qui représentent alors une très faible part de l'investissement nécessaire pour la réalisation de l'amélioration.

Cependant, ces méthodes de certification ex-ante ont une incertitude plutôt élevée sur le montant d'économie calculé sur chaque projet. L'existence de cette incertitude est tolérée lorsque la méthode de certification est utilisée pour comptabiliser les économies d'énergie issues d'un grand nombre de projets, en raison du foisonnement que ce grand nombre génère. En revanche, les méthodes de certification ex-ante s'accommodent mal de projets vastes mais en nombre plus réduits car l'incertitude représente un volume d'économie important par projet réalisé.

Méthode de certification ex-post ou hybride

Dans le cas où les méthodes de certification ex-ante ne sont pas en mesure de certifier correctement les économies d'énergie générées par certains projet d'amélioration, il est possible d'envisager des méthodes de certification hybrides comme cela a été introduit dans le système italien. Ces méthodes sont adaptées pour la certification d'économies d'énergie provenant d'amélioration d'équipements dont la performance varie en fonction de conditions de fonctionnement ou si l'usage de l'équipement considéré est fortement variable.

De la même manière, le système français prévoit de laisser l'initiative aux obligés ou éligibles de présenter des méthodes d'évaluation des économies d'énergie d'un projet par-

ticulier. L'acteur qui réalise cette opération « non-standard » doit alors apporter la preuve des économies réalisées. Les coûts de certification peuvent alors augmenter très vite.

Ces procédures de certification combinent des aspects issus de méthodes ex-ante (détermination de certaines grandeurs par déclaration) avec des éléments de vérification ex-post. Elles sont tout à fait comparables aux méthodes d'évaluation utilisées pour l'option A de [IPMVP, 2007] décrites dans le chapitre 5.

Le principal intérêt de ces méthodes est de diminuer l'incertitude sur l'évaluation du montant d'économie d'énergie des améliorations de certaines installations. Elles permettent d'éviter l'introduction de « fausse monnaie » sur le marché d'échange de certificats d'économie d'énergie, en limitant les conséquences d'une dissymétrie d'information entre le régulateur et l'investisseur dans le projet d'amélioration.

8.2.3 Additionnalité

Enfin, comme tout instrument de politique public, l'effet d'aubaine est un facteur qui doit être maîtrisé. On cherche donc à récompenser uniquement les efforts additionnels réalisés par les acteurs du marchés.

Cette additionnalité revêt deux aspects :

- un aspect technique : seules les économies d'énergies provenant d'un effort technologique supplémentaire par rapport à ce qu'il se fait habituellement doivent être comptabilisées ;
- un aspect d'éligibilité : seuls les acteurs qui font un effort supplémentaire pour investir doivent être récompensés et bénéficier des certificats d'économies d'énergie et non ceux qui réalisent déjà traditionnellement des investissements en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique, ou qui seraient susceptibles de profiter du système pour en tirer profit directement

Cette deuxième définition peut être assez restrictive comme c'est le cas dans le dispositif français. Il s'agit d'un débat juridique dans lequel nous n'entrerons pas dans le cadre de la rédaction de ce document, mais on pourra se reporter à [Adnot, 2007b] en ce qui concerne les conditions d'éligibilité des différents acteurs.

Nous nous intéresserons ici à l'additionnalité technique. Un premier critère nécessaire (retenu notamment dans le dispositif français) pour qu'une action soit considérée comme additionnelle, est que son temps de retour sur investissement soit supérieur à trois ans. En deçà, on considère que le choix de cet investissement aurait été celui choisi par l'investisseur.

Pour les opérations certifiées par des méthodes ex-ante (méthodes « standards »), la performance additionnelle des améliorations est calculée par rapport à une référence qui peut être :

- la performance moyenne du parc d'équipements installés ;
- la performance moyenne du marché des équipements installés.

Pour les équipements à durée de vie courte, les économies additionnelles sont calculées par rapport au marché actuel. Le fort taux de renouvellement de ces équipements implique que naturellement les performances des équipements habituellement installés suivent le niveau de performance du marché.

Pour le renouvellement d'équipements existants à durée de vie plus longue (15 ans), les économies additionnelles sont généralement calculées sur le parc d'équipements installés. Cela permet de valoriser davantage les économies réalisées, et d'espérer augmenter le taux de renouvellement de ces équipements, de manière à changer plus rapidement la performance moyenne du parc d'équipements installés.

Enfin, pour l'installation d'équipements neufs à durée de vie longue, il nous semble que l'argument d'accélération du taux de renouvellement de l'équipement ne peut plus être retenu. Dans ce cas, l'effort additionnel n'est plus d'anticiper un renouvellement mais de choisir un équipement dont la performance est au-dessus de la moyenne du marché. Les performances des équipements neufs à durée de vie longue doivent donc être comparées au niveau de performance moyen du marché.

8.3 Méthode de certification des améliorations des installations de production d'eau glacée

A partir de l'analyse des caractéristiques des méthodes de certification type ([Adnot, 2007a]), nous avons voulu savoir si les améliorations réalisées sur les installations de production frigorifique dans le cadre d'un contrat de performance énergétique, étaient susceptibles d'être intégrées dans un système de certificats blancs. Dans ce but, nous avons cherché à définir une méthode de certification permettant de calculer un montant d'économie d'énergie dû au remplacement d'un groupe de production d'eau glacée.

Pour ce faire, nous allons exploiter la méthodologie de calcul du protocole d'évaluation que nous avons décrite dans la deuxième partie de ce document. Nous allons, dans un premier temps, sélectionner les stratégies de documentation des entrées et des paramètres des modèles utilisés aux spécificités des systèmes de certificats blancs. Dans un deuxième temps, nous suggérons une méthode permettant de calculer un montant d'économies d'énergie additionnelles, pour autant que les éléments en notre possession nous permettent de le faire.

Conformément aux caractéristiques attendues de la part d'une méthode de certification adaptée aux systèmes de certificats d'économie d'énergie, la méthode que nous allons développer doit être :

- simple à mettre en oeuvre ;
- déterminer dans la mesure du possible un montant d'économies d'énergie avant amélioration ;
- permettre de déterminer des économies additionnelles.

8.3.1 Principe de la méthode de calcul

Calcul des consommations d'énergie

Nous rappelons brièvement la méthode de calcul des consommations d'énergie des installations de production d'eau glacée que nous avons construite au chapitre 7 (cf. figure 8.2).

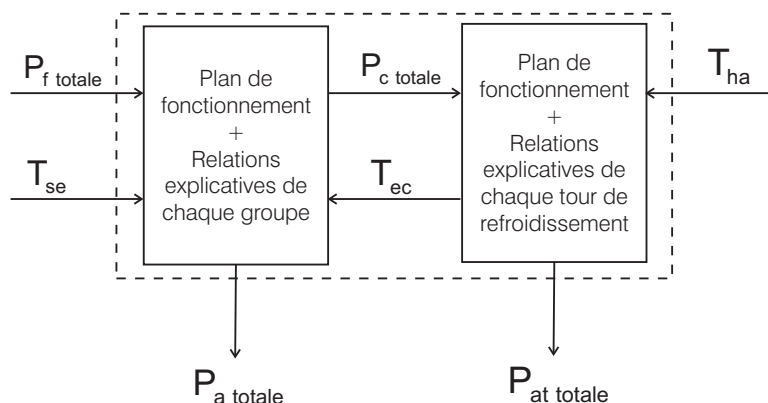


FIG. 8.2 – Représentation de la procédure de calcul des performances énergétiques d'une installation de production d'eau glacée.

Cette représentation permet de calculer les puissances électriques consommées par l'ensemble des groupes de production d'eau glacée et des tours de refroidissement, à partir des entrées et des paramètres du tableau 8.1.

	Description	Grandeurs
Entrées	Courbe de charge des besoins frigorifiques	- puissance frigorifiques totale demandée $P_{f\ totale}$ en $[kW]$ - temps de fonctionnement N_h à la puissance P_f donnée en $[heures]$
	Conditions de fonctionnement	- température d'eau en sortie d'évaporateur $T_{e\ se}$ en $[^{\circ}C]$ - température humide de l'air T_{ha} en $[^{\circ}C]$
Paramètres	Fonctionnement à pleine charge des groupes de production d'eau glacée	pour chaque groupe : - C_1 et C_2 - D_1 et D_2
	Fonctionnement à charge partielle des groupes de production d'eau glacée	- K_{cp}
	Plan de fonctionnement des groupes de production d'eau glacée	ordre de démarrage
	Fonctionnement des tours de refroidissement	- C_t
	Plan de fonctionnement des tours de refroidissement	ordre de démarrage

TAB. 8.1 – Entrées et paramètres pour le calcul des consommations d'énergie d'une installation de production d'eau glacée.

Paramétrage

Les résultats de la deuxième partie de ce document nous ont permis de déterminer trois approches pour documenter les paramètres de ce calcul :

- une approche « mesures » ;
- une approche « documents constructeurs » ;
- une approche « par défaut ».

La faisabilité de cette documentation en fonction de l’approche choisie a été résumée dans le tableau 7.14.

De plus, dans le cadre d’une méthode de certification, nous avons vu que les approches demandant des ressources importantes n’étaient pas adaptées. C’est pourquoi nous évitons au possible d’avoir recours aux mesures pour déterminer les paramètres nécessaires au calcul des consommations. De même, l’approche « valeurs par défaut » est privilégiée par rapport à l’approche documents « constructeurs » dans la mesure où elle permet d’éviter l’étape de recherche des documents.

Ainsi, nous opterons pour l’approche « valeurs par défaut » pour les paramètres représentant le fonctionnement des tours de refroidissement et le fonctionnement à pleine charge des groupes de production d’eau glacée. En revanche, pour déterminer le paramètre de charge partielle des groupes, nous n’avons d’autre choix que d’utiliser les données constructeurs pour les groupes récents disponibles sur la base de données d’Eurovent, et de réaliser quelques mesures pour les groupes plus anciens (antérieurs à 2005). Nous résumons les stratégies choisies pour déterminer les paramètres nécessaires la certification des performances des installations de production d’eau glacée dans le tableau 8.2 :

	Groupe de production d’eau glacée		Tour de refroidissement humide ouverte
	Pleine charge	Charge partielle	
Mesures		pour les groupes antérieurs à 2005	
Données « constructeurs »		pour les groupes postérieurs à 2005	
Valeurs par défaut	oui		oui

TAB. 8.2 – Origine des données nécessaires au paramétrage des modèles de groupes de production d’eau glacée et de tour de refroidissement dans le cadre d’un système de certificats blancs.

Enfin, nous avons vu que les plans de fonctionnement des installations doivent être imposés par l’évaluateur de la même manière que l’exploitant envisage de faire fonctionner les installations. Nous avons vu qu’il était assez difficile de représenter fidèlement le fonctionnement des installations à cause des aléas de fonctionnement par nature imprévisibles. Les consommations d’énergie calculées sont donc des consommations « hors aléas », comme nous l’avons vu en conclusion du chapitre 7.

Dans le protocole d'évaluation des performances et des économies d'énergie décrit dans la deuxième partie de ce document, les données en entrées de la méthode de calcul étaient déterminées par mesure sur site. Cela permettait d'ajuster les consommations d'énergie de la période de référence aux conditions réelles de la période de suivi. Dans le cadre d'un système de certificats blancs, cette méthode pourrait être exploitée telle quelle pour calculer les différentes consommations d'énergie. Mais il s'agirait d'une méthode de certification ex-post, qui, comme nous l'avons vu, ne permet pas d'exploiter pleinement les avantages attendus des systèmes de certificats blancs. Nous avons donc cherché une méthode de représentation ex-ante de la demande énergétique, qui nous permet au final de calculer des consommations d'énergie normalisées.

8.3.2 Représentation ex-ante de la demande énergétique

Courbes de charge d'immeubles de bureaux typiques

La méthode d'évaluation de la demande énergétique que nous proposons s'appuie largement sur les travaux de simulations réalisés par [Filfi, 2006]. Cet auteur a réalisé des simulations des consommations d'énergie d'un échantillon d'immeubles de bureaux représentatif du parc français, et a en particulier mené une étude de sensibilité de la consommation d'énergie de ces bâtiments, à une douzaine de paramètres significatifs. Cet échantillon comprend cinq types de bâtiments allant des bâtiments de surface importante fortement vitrés aux bâtiments de plus petite taille (cf. tableau 8.3).

Nomenclature	Description
Type 1-a	Mur rideau largement vitré, plateau large et salle de réunion aveugle, bureaux paysagés de 15000 m^2
Type 1-b	idem type 1-a avec bureaux cloisonnés
Type 1-c	idem type 1-b sauf plateau mince (bureaux cloisonnés) et salle de réunion sur l'extérieur
Type 2	Immeuble rénové de 5000 m^2 , structure plutôt lourde et bureaux cloisonnés
Type 3	Immeubles de petite taille (1000 m^2)

TAB. 8.3 – Typologie des bâtiments de bureaux climatisés (d'après [Filfi, 2006]).

Ces bâtiments ont été équipés de différents types de systèmes de distribution d'énergie frigorifique alimentés par des groupes de production d'eau glacée en cohérence avec le type de bâtiment (cf. tableau 8.4) :

- des système « tout eau » : ventilo-convecteurs (VC) ;
- des systèmes « tout-air » : centrale de traitement d'air et distribution à débit d'air constant (DAC) ou variable (DAV).

Type de bâtiment	Type de système de climatisation		
	VC	DAC	DAV
Type 1-a	X		X
Type 1-b	X	X	
Type 1-c	X	X	
Type 2	X		
Type 3	X		

TAB. 8.4 – Type de système associé aux différents types de bâtiment (d’après [Filfli, 2006]).

D’autres systèmes de distribution sont pris en considération dans ces travaux (comme les appareils de climatisation « multi-blocs » et les systèmes à débit de réfrigérant variable). Ces systèmes n’entrent pas dans le champ du protocole que nous présentons dans ce document. Nous ne les prendrons donc pas en considération.

Notons également que les bâtiments considérés sont dimensionnés de manière à respecter les exigences minimales de la réglementation thermique 2000 ([Filfli, 2006]). Les performances du bâti et des équipements simulés correspondent donc aux performances d’immeubles de bureaux et d’équipements récents.

Les travaux décrits dans [Filfli, 2006] ont mis en évidence les différentes variables qui déterminent la consommation d’énergie frigorifique des immeubles de bureaux. Ces variables peuvent être classées en 4 catégories représentant :

- le climat (notamment la température extérieure) ;
- le type de bâtiment (structure des parois opaques et vitrées, inertie du bâtiment) ;
- les installations de distribution de l’énergie frigorifique et pour la ventilation (type de système, performance des auxiliaires, isolation des réseaux et mode de gestion des installations) ;
- les apports internes, liés à l’usage du bâtiment (éclairage, équipement de bureau-tique et occupation des locaux)

Dans le cadre de la méthode de certification que nous mettons en place et qui porte sur l’évaluation des performances et des économies d’énergie générées par une amélioration portant sur les groupes de production d’eau glacée, nous déterminons les économies d’énergie dues à cette amélioration *ceteris paribus*. *Nous supposons donc qu’aucune amélioration n’est réalisée sur le bâtiment, l’éclairage, les équipements de bureautique et sur les installations de distribution de l’énergie frigorifique, ainsi que leur mode de gestion.* Dans le cas contraire, il est évident qu’une autre méthode portant spécifiquement sur l’évaluation de ces améliorations devrait être mise en place.

De la même manière, l’occupation des locaux ne peut pas être considérée comme une variable d’ajustement entre les périodes de référence et de suivi dans le cadre d’une méthode de certification des économies d’énergie. Les scénarios d’occupation décrits dans les simulations de [Filfli, 2006] sont représentatifs de l’occupation des immeubles de bureaux du parc français.

La seule variable considérée pour l’ajustement des consommations entre les périodes

d'évaluation est donc le climat. Dans le cadre de la campagne de simulation réalisée par [Filfli, 2006], le climat a été modélisé à l'aide des données climatiques de la réglementation thermique ([Méthode Th-C-E, 2005]). Ces courbes de charge sont disponibles pour les configurations bâtiment/système indiquées dans le tableau 8.4 dans deux climats : Nice et Trappes. [Filfli, 2006] a montré que la distinction de ces deux climats suffisait à représenter l'influence du climat français sur les consommations de climatisation, le climat de Nice représentant les zones climatiques réglementaires H3, et le climat de Trappes les zones climatiques H1 et H2.

Le matériel de travail issus des travaux de [Filfli, 2006], auquel nous avons eu accès, se présente sous la forme de courbes de charge horaires des besoins frigorifiques (notés $P_{f \text{ total}}$) d'immeubles de bureaux types. Parallèlement, à ces courbes de charges, nous disposons des fichiers météorologiques utilisés lors des simulations du comportement des bâtiments, et donc des température sèches et humides de l'air T_{ha} . Ces données peuvent donc se présenter sous la forme de 8 760 triplets $[P_{f \text{ total}}; T_a; T_{ha}]$ représentant chacun une heure de fonctionnement.

Enfin, la température de l'eau en sortie de l'évaporateur a été fixée comme égale à la température de consigne fixée par l'occupant de l'immeuble. Cette température est égale à sa valeur de dimensionnement : $7^\circ C$.

Ajustement des courbes de charge

Ces courbes de charges correspondent aux besoins frigorifiques de bâtiments types dont les paramètres sont représentatifs du parc d'immeubles de bureaux français. La surface de ces immeubles types est également représentative de la surface typique du parc.

Cependant, dans le cadre d'une méthode de certification d'un projet particulier, nous cherchons à adapter ces besoins typiques au bâtiment réel de manière à ce que le montant d'économies d'énergie certifiées soit en cohérence avec la taille réelle du site. Nous décidons de normer les courbes de charges obtenues par la surface climatisée des bâtiments types. Par suite, pour les adapter aux cas réels, nous utiliserons la donnée de la surface climatisée pour adapter le volume de besoins frigorifiques typiques à la taille du site réel.

D'autres méthodes d'ajustement pourraient être envisagées. On peut en particulier penser à un ajustement des courbes de charges à la puissance des groupes frigorifiques installés. Toutefois, l'objectif d'un système de certificats blancs est d'orienter le choix des investisseurs vers des équipements performants de manière à augmenter les performances du parc d'équipements. L'évaluation des performances intrinsèques des équipements doivent donc être réalisée indépendamment des caractéristiques particulière d'un bâtiment, sur une base de comparaison commune. De plus, un ajustement à la puissance installée attribuerait une prime aux installations surdimensionnées, en gonflant artificiellement le montant des économies certifiées.

C'est pourquoi, nous pensons qu'il est plus judicieux d'ajuster la puissance frigorifique nominale totale des groupes à la puissance maximale des courbes de charge ajustée à la surface climatisée. De cette manière, nous redimensionnons l'installation aux besoins typiques des bâtiments concernés par l'amélioration. La puissance électrique nominale de

chaque groupe seront ajustées avec le même rapport. Les groupes de production d'eau glacée ainsi ajustés sont adaptés aux données des courbes de charge tout en représentant fidèlement les performances des équipements installés : l'ajustement des puissances nominales avec le même rapport conserve les valeurs de l'*EER* et du *ESEER* de chaque groupe.

Enfin, les caractéristiques des tours de refroidissement doivent être ajustée dans la même mesure. Ces caractéristiques étant les débits d'eau et d'air nominaux, nous utilisons le même rapport d'ajustement que pour les groupes pour déterminer les caractéristiques ajustées des tours.

Réduction de courbes de charge

Bien qu'il soit désormais possible d'exploiter directement les courbes de charge, il nous semble délicat de manier des feuilles de calcul contenant 8 760 lignes. Nous allons donc réduire les courbes de charges.

Nous proposons de réduire ces courbes de charge par décile de puissance frigorifique appelée. Sur chaque décile, nous calculons donc :

- la puissance frigorifique moyenne ;
- la température moyenne de l'air extérieur ;
- la température humide moyenne de l'air extérieur ;
- le nombre d'heures où la puissance moyenne est appelée.

Après réduction, une courbe de charge pour une configuration bâtiment/système dans un climat donné se présente sous la forme exposée dans le tableau 8.5 :

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	8410	71	67	47	30	33	49	31	18	4
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	9,5	19,8	20,7	21,5	22,1	23,1	24	25,1	26,3	24,3
Température humide moyenne de l'air en [°C]	8,3	15,5	15,8	16,6	17,0	17,6	17,4	17,8	18,4	18,5
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,0	5,8	9,9	13,7	17,3	22	25,8	29,2	33,6	37,3

TAB. 8.5 – Courbe de charge type réduite - Exemple de la configuration 1a-DAC à Trappes.

Les courbes de charges réduites des autres configurations figurent en annexe.

Nous avons testé l'influence de la réduction de courbes de charge en simulant les consommations d'électricité d'un groupe de production d'eau glacée de puissance adaptée

à chaque configuration. Nous avons ensuite comparé les consommations d'énergie calculées à partir de ces courbes de charges réduites par rapport au même calcul réalisé à partir des courbes de charge non réduites. La différence de consommations est minime : la réduction des courbes de charges sous-évalue très légèrement les consommations d'énergie mais seulement de 2% dans le pire des cas (cf. tableau 8.6).

Type de bâtiment	Trappes			Nice		
	Type de système de climatisation VC	DAC	DAV	Type de système de climatisation VC	DAC	DAV
Type 1-a	-0,2 %		-0,4 %	-0,55 %		-0,7 %
Type 1-b	-0,4 %	-0,2 %		-0,4 %	-0,2 %	
Type 1-c	-0,4 %	-0,4 %		-0,2 %	-1,9 %	
Type 2	-0,3 %			-0,3 %		
Type 3	-0,5 %			-0,3 %		

TAB. 8.6 – Influence de la réduction des courbes de charge sur le calcul des consommations d'énergie.

Ces courbes de charge réduites nous donnent donc une représentation typique de la demande énergétique des immeubles de bureaux en fonction de paramètre facilement identifiables comme le climat, le type de bâtiment et le système de climatisation. Leur réduction permet une manipulation plus aisée et donc une meilleure intégration dans une méthode de certification des économies d'énergie en vue de l'émission de certificats blancs.

8.3.3 Calcul du montant d'économie d'énergie

Nous venons de mettre en place les éléments nous permettant de calculer les consommations typiques des installations de production d'eau glacée. Il nous reste donc à décrire les éléments permettant de calculer le montant des économies d'énergie au sens des certificats d'économie d'énergie. La description de ces éléments revient à poser la question de l'additionnalité des améliorations.

Nous avons spécifié, en début de chapitre, que les économies d'énergie additionnelles réalisées par le remplacement d'un équipement de durée de vie longue doivent être calculées par rapport à la performance moyenne du parc. Pour établir cette performance moyenne, il faut donc disposer de données sur l'état du parc actuel. [EECAC, 2003] présente une étude du parc européen de groupes de production frigorifique. Les données utilisées pour l'étude concernent l'année 1998, et nous indiquent que ce parc de groupes frigorifiques à condensation à eau présentait un *EER* moyen de 3,73, tandis que celui du parc de groupes frigorifiques à condensation à air était de 2,53. Ces valeurs peuvent donc constituer une bonne référence pour calculer les consommations d'énergie avant amélioration des installations sur lesquelles est réalisé le renouvellement de groupe. Néanmoins, étant donné que la durée de vie des groupes frigorifique est d'une quinzaine d'années, ces données mériteraient d'être réactualisées pour caractériser les économies d'énergie d'un renouvellement de groupe en 2008. De plus, la méthode exposée dans [EECAC, 2003] devrait être appliquée aux données du parc français.

A défaut, il est possible d'utiliser le critère du temps de retour. Nous avons vu que dans le dispositif français, une action peut être considérée additionnelle dans la mesure où son temps de retour est supérieur à trois ans. Avec les outils que nous avons mis en place, nous sommes en mesure de caractériser l'installation en l'état et après amélioration. A l'aide des courbes de charges réduites, nous obtenons rapidement le montant d'économies d'énergie. Les économies générées sont valorisées au coût de l'énergie puis comparées au montant de l'investissement. Dans le cas où le temps de retour est supérieur à trois ans, les économies d'énergie peuvent raisonnablement être considérées comme additionnelles.

Enfin, le montant annuel des économies générées doit être agrégé sur la durée de vie de l'amélioration. La durée de vie typique d'un groupe de production d'eau glacée est de quinze ans. Cependant, nous avons montré dans la première partie de ce document l'importance des prestations de conduite et de maintenance sur les performances énergétiques de installations. Aussi, il nous semble raisonnable de considérer que la tenue des performances de l'amélioration est conditionnée au contrat de services énergétiques associé à l'exploitation de l'installation. Ceci nous conduit à conclure que la durée de vie de l'amélioration devrait correspondre à la durée du contrat de services énergétiques, de type contrat de performance énergétique, qui porte la réalisation de l'amélioration.

8.4 Bilan : certification ex-ante des améliorations des installations de production d'eau glacée

Dans ce chapitre, nous avons exploité le protocole d'évaluation des performances énergétiques conçu au chapitre 7 pour le calcul des économies d'énergie générées par une amélioration réalisée sur les installations de production d'eau glacée. Nous l'avons adapté à la problématique de l'émission de certificats d'économie d'énergie en introduisant les mécanismes permettant de limiter les coûts de transaction associés à cette émission.

Nous avons donc eu recours aux valeurs par défaut issues de la littérature ou à l'exploitation des éléments fournis par les constructeurs les plus diffusés (comme l'indice *ESEER*). La construction de courbes de charge réduites offre une base de données normalisées pour l'ajustement des consommations d'énergie. La méthode d'ajustement des courbes de charge types au projet étudié permet de calculer un volume de consommation d'énergie et par suite, d'économies d'énergie, en cohérence avec la taille du projet. Le déroulement de cette méthode est représenté sur la figure 8.3.

Nous suggérons que la bibliothèque de courbes de charge type pourrait être enrichie en distinguant l'âge des bâtiments dans lesquels sont réalisées les améliorations. Les courbes de charges en notre possession ont été construites sur la base des caractéristiques de bâtiments dont les performances respectent au moins les performances minimales exigées par la réglementation thermique 2000. Ces données ne reflètent donc pas la disparité entre des bâtiments dont les performances de l'enveloppe sont naturellement différentes. Notons cependant que, dans le dispositif français, les méthodes de certification portant sur l'émission de certificats blancs pour le remplacement de climatiseurs multi-blocs n'introduisent pas de distinction selon l'âge du bâtiment, mais uniquement selon l'usage du bâtiment tertiaire (cf. [Arrêté du 19 juin 2006]).

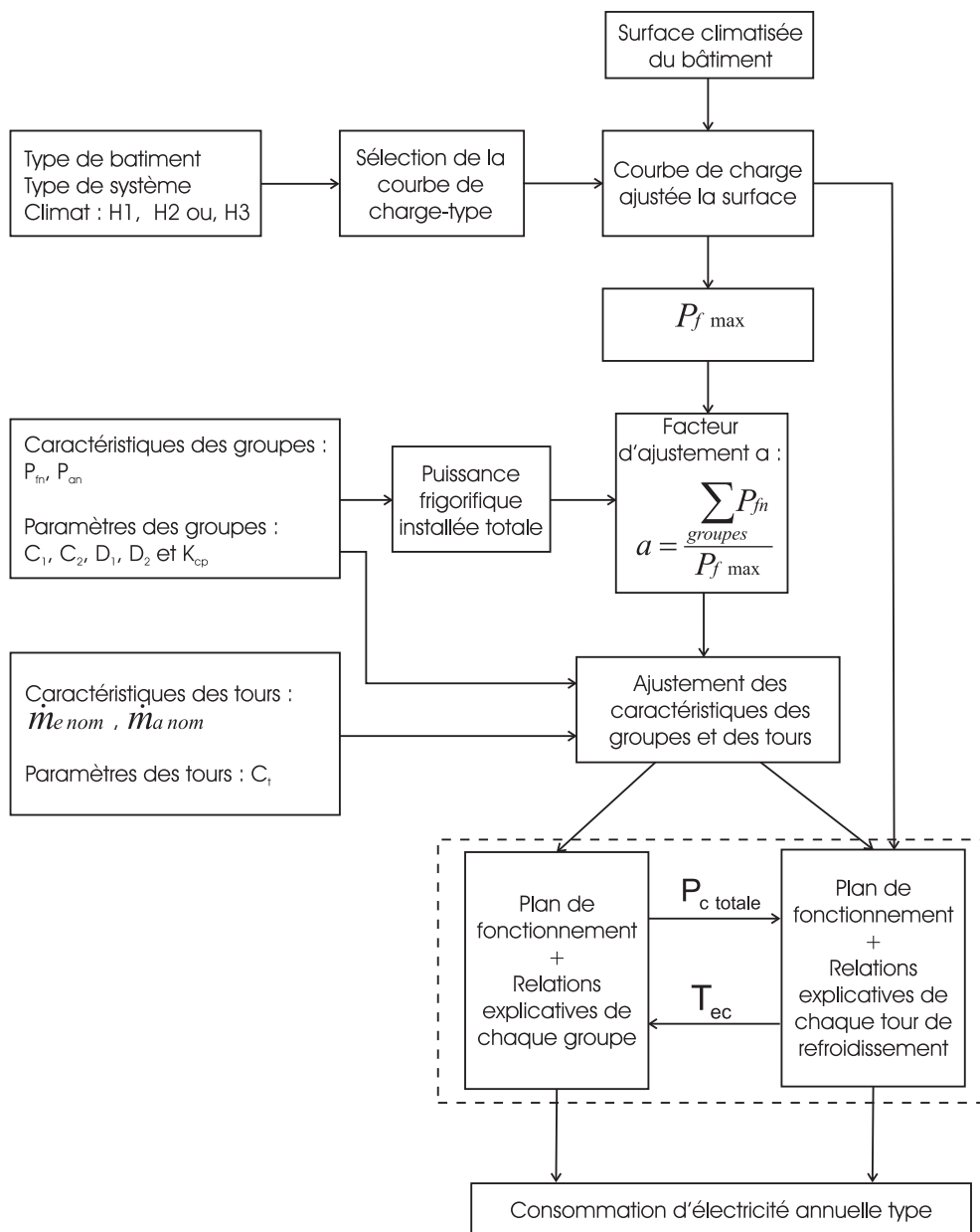


FIG. 8.3 – Proposition de méthode de calcul des consommations d'énergies annuelles type dans le cadre d'un système de certificats d'économie d'énergie.

Enfin, la question de l'additionnalité des améliorations réalisées reste ouverte. Les données de parc de [EECAC, 2003] mériteraient d'être actualisées. A défaut, nous suggérons d'utiliser le critère du temps de retour pour déterminer au cas par cas l'additionnalité des économies réalisées.

Conclusion

L'efficacité énergétique portée par les contrats de services énergétiques repose sur l'interaction positive des prestations qui les composent. Nous avons montré que la dévolution d'un contrat de service global, comme le contrat de performance énergétique, permet de transférer la majeure partie des risques au prestataire. De cette manière, l'efficacité énergétique des prestations de services énergétiques s'en trouve renforcée.

Pour autant, la mise en place d'un contrat de performance énergétique est conditionnée à l'existence de protocoles autorisant le suivi et l'évaluation des performances des installations prises en charge. La description dans ce document d'un tel protocole, dédié à la mise en place de contrats de performance énergétique pour l'amélioration des installations de production d'eau glacée, a mis en évidence certaines difficultés techniques de mise en œuvre. En premier lieu, l'instrumentation nécessaire au suivi des installations en phase d'exploitation peut se révéler coûteuse et par conséquent réduire la valeur des économies d'énergie générées par l'amélioration. Par ailleurs, la caractérisation des performances des équipements à partir de mesures uniquement impose une période d'observation assez longue, notamment en ce qui concerne les groupes de production d'eau glacée.

C'est pourquoi, nous avons favorisé l'émergence d'un protocole d'évaluation reposant en grande partie sur des données raisonnablement accessibles. Pour cela, nous avons exploité des modèles issus de la littérature afin de représenter le fonctionnement des équipements qui composent une installation. Ces modèles ont été sélectionnés sur leur capacité à représenter le comportement des équipements dans le but d'évaluer leur consommation d'énergie et à être paramétrés à partir des données disponibles, diffusées par exemple sur les documents « constructeurs ». De cette manière, nous avons réduit l'envergure du protocole de mesure à mettre en œuvre.

Ce protocole d'évaluation a ensuite été adapté aux contraintes de la certification des économies d'énergie dans le cadre de la mise en place d'un dispositif de certificats d'économie d'énergie. Afin de s'intégrer pleinement dans ce dispositif, le montant des certificats d'économie d'énergie doit préférentiellement être calculé à l'aide de méthodes d'évaluation ex-ante de manière à permettre l'émission de certificats parallèlement à la réalisation des améliorations. Ceci permet de ne pas dévaluer la valeur de ces certificats à cause de procédures de certification trop coûteuses.

Pour ce faire, nous avons établi une bibliothèque de courbes de charge types de manière à ajuster les consommations d'énergie des installations avant et après amélioration à des conditions de fonctionnement typiques, ce qui permet de se dispenser de la mise en œuvre de protocoles de suivi et permet une détermination ex-ante du montant de certificats

correspondant aux améliorations. De plus, cette normalisation des conditions de fonctionnement permet de révéler l'amélioration des performances énergétiques des équipements en dehors de l'influence de la qualité des bâtiments dans lesquels ils sont installés. Nous suggérons cependant que ce protocole de certification pourrait être simplifié davantage encore afin de trouver sa pleine efficacité dans le cadre d'un système de certificats blancs.

Enfin, ce protocole certifie des économies réalisées par des travaux d'amélioration dans le cadre d'un contrat de performance énergétique, ou à minima, dans le cadre d'un contrat d'exploitation des installations avec garantie de résultat sur le maintien des performances dans le temps. Nous avons, en effet, montré toute l'importance, dans ce domaine, des prestations de conduite et de maintenance liées à l'exploitation des installations.

Pour autant, l'efficacité énergétique particulière de ces prestations est masquée par les engagements sur la performance globale des installations. Le protocole d'évaluation, et plus encore celui de certification, permettent surtout d'évaluer l'impact d'améliorations des équipements de production d'eau glacée, mais ne permet pas de faire émerger les gains espérés par une conduite ou une maintenance optimisée de la part du prestataire, par rapport à une conduite plus classique.

Or ces prestations sont appelées à jouer un rôle important dans l'avenir, et notamment lorsqu'elles portent sur les installations de distribution d'eau glacée en particulier, et de distribution d'énergie utile en général. Grâce aux avancées technologiques dans le domaine des télécommunications, on peut observer l'émergence de services énergétiques proposées par de nouveaux acteurs. Parallèlement au suivi à distance des installations, ces nouvelles offres de services comprennent désormais la prise en charge de la conduite à distance des installations de distribution d'énergie utile.

Favorisés par la prise de conscience de la problématique énergétique et du réchauffement climatique par un nombre croissant de citoyens-consommateurs, des contrats de performance énergétique portant sur ces installations de distribution ne devraient pas tarder à voir le jour. Il conviendra donc, comme nous l'avons fait dans ce document pour les installations de production d'eau glacée, de développer les protocoles nécessaires pour l'évaluation des économies d'énergie générées sur ces installations. S'agissant de la prise en charge d'installations de distribution d'énergie utile, entre le consommateur et le producteur d'énergie utile, il nous semble que les effets interactifs de cette prise en charge devraient être analysés avec le plus grand soin.

Nomenclature

Symboles latins

b_0	Terme constant, correspondant à une consommation d'énergie constante et indépendante des variables considérées dans le modèle de régression	$[-]$
b_i	Coefficients correspondants respectivement aux variables indépendantes X_i	$[-]$
\dot{C}	Débit de capacité calorifique	$[W/K]$
C_1, C_2	Paramètres pour le modèle REFLIQ	$[-]$
$C_{aux\ CTA}$	Consommation des auxiliaires de centrales de traitement d'air	$[kWh]$
$C_{aux\ évac}$	Consommation des auxiliaires des équipements d'évacuation de la chaleur	$[kWh]$
$C_{aux\ rés}$	Consommation des auxiliaires des réseaux de distribution	$[kWh]$
$C_{aux\ term}$	Consommation des auxiliaires des unités terminales	$[kWh]$
C_{bur}	Consommation des équipements de bureautique	$[kWh]$
C_{ch}	Consommation de chauffage	$[kWh/an]$
$C_{écl}$	Consommation d'éclairage	$[kWh]$
C_{froid}	Consommation d'énergie frigorifique	$[kWh]$
$C_{ I}$	Consommation réelle du système évalué sur la période d'évaluation I	
$\hat{C}_{ I}$	Évaluation de la consommation sur la période I	
c_{pa}	Capacité calorifique de l'air à pression constante	$[J/(kg.K)]$
c_{pa}^{sat}	Capacité calorifique de l'air saturé à pression constante	$[J/(kg.K)]$
c_{pe}	Capacité calorifique de l'eau à pression constante	$[J/(kg.K)]$
C_t	Caractéristique de la tour de refroidissement (modèle Recknagel)	
D_1, D_2	Paramètres pour le modèle REFLIQ	$[-]$
DJX	Degrés-jours de base X	$[^{\circ}C]$
DP	Déperditions moyennes liées à l'enveloppe du local chauffé par degré d'écart	$[W/K]$
DR	Déperditions moyennes liées au renouvellement d'air du local chauffé par degré d'écart	$[W/K]$
Ecl	Gestion et efficacité de l'éclairage	$[-]$
EER	Energy Efficiency Ratio	$[-]$
$EER_{X\%}$	Energy Efficiency Ratio au taux de charge X (X exprimé en %)	$[-]$

$ESEER$	European Seasonal Energy Efficiency Ratio	$[-]$
F	Facteur de couverture des besoins par les apports gratuits	$[-]$
f_I	Modèle explicatif défini sur une période d'évaluation I	
G_{bureau}	Mode de gestion et efficacité des équipements de bureautique	$[-]$
i	Facteur représentant les intermittences de fonctionnement	$[-]$
$ISO_{rés}$	Isolation des réseaux de distribution	
I_0	Débit d'air relatif	$[-]$
I_{min}	Débit d'air relatif minimum	$[-]$
K_{cp}	Paramètre de charge partielle du modèle REFLIQ	$[-]$
\dot{m}_a	Débit massique d'air	$[kg/s]$
$\dot{m}_{a\ min}$	Débit massique d'air minimal (modèle de tour de refroidissement « recknagel »)	$[kg/s]$
\dot{m}_e	Débit massique d'eau	$[kg/s]$
n	Nombre de variables indépendantes	
$NDJU$	Nombre de degrés-jours unifié de base $X = 18^\circ C$	$[kW]$
$NDJX$	Nombre de degrés-jours de base X , correspondant à la température de non-chauffage du local considéré	$[kW]$
$NDJX^{référence}$	Nombre de degrés-jours de base X , correspondant à la température de non-chauffage du local considéré sur une période de référence	$[kW]$
N_h	Temps de fonctionnement à une puissance $P_{f\ totale}$	$[heures]$
NUT	Nombre d'unités de transfert	$[-]$
P_a	Puissance électrique absorbée par un groupe de production d'eau glacée	$[kW]$
$P_{a\ totale}$	Puissance électrique absorbée par l'ensemble des groupes de production d'eau glacée d'une installation	$[kW]$
P_{ac}	Puissance électrique absorbée par le ou les compresseurs d'un groupe de production d'eau glacée	$[kW]$
P_{at}	Puissance électrique consommée par une tour de refroidissement	$[kW]$
P_{at}	Puissance électrique consommée par l'ensemble des tours de refroidissement d'une installation	$[kW]$
P_c	Puissance calorifique à évacuer	$[kW]$
P_f	Puissance frigorifique fournie par un groupe de production d'eau glacée	$[kW]$
$P_{f\ totale}$	Puissance frigorifique fournie par l'ensemble des groupes de production d'eau glacée d'une installation	$[kW]$
R	Rapport du débit calorifique minimum sur le débit calorifique maximum	$[-]$
R_{ch}	Rendement moyen annuel de l'installation sur la période de fonctionnement	$[-]$
T_a	Température de l'air	$[^\circ C]$
T_{ha}	Température humide de l'air	$[^\circ C]$

T_e	Température de l'eau	$[^{\circ}C]$
V_{ent}	Réduction de débit d'air neuf	$[-]$
X_i	Variables indépendantes	$[-]$
$X_{ I}$	Vecteur composé des p variables indépendantes $X_{ I}^p$ observées sur la période d'évaluation I	$[-]$
\hat{Y}	Variable dépendante expliquée, qui, dans le cas de notre étude, correspond à une quantité d'énergie consommée pendant une période de consommation (1 jour, 1 mois, 1 année)	$[-]$

Symboles grecs

ϵ	Erreur résiduelle commise par l'évaluation	$[-]$
η	efficacité des tours de refroidissement	$[-]$
η_{aux}	Rendement des ventilateurs et pompes	$[-]$
η_{chaud}	Rendement de la chaudière	$[-]$
η_{froid}	Rendement de l'appareil de production frigorifique	$[-]$
λ	Rapport des débit d'air relatifs	$[-]$
τ	taux de charge	$[kW/kW]$

Indices

<i>cond</i>	côté condenseur
<i>corrgee</i>	valeur corrigée
<i>cumac</i>	cumulé et actualisé
<i>ec</i>	entrée condenseur
<i>ee</i>	entrée évaporateur
<i>evap</i>	côté évaporateur
<i>ext</i>	extérieur
<i>et</i>	entrée tour
<i>fl</i>	pleine charge (« full load »)
<i>nom</i>	valeur nominale
<i>normales</i>	valeur dans les conditions de fonctionnement normales (normalisées)
<i>ref</i>	valeur sur une période de référence
<i>sc</i>	sortie condenseur
<i>se</i>	sortie évaporateur
<i>st</i>	sortie tour
<i>suivi</i>	valeur sur une période de suivi
$X\%$	valeur associée aux conditions de fonctionnement au taux de charge $X\%$

Bibliographie

- [ADEME, 2005] *Énergie et secteur des bâtiments - Parcs et Consommations*, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, janvier 2005.
- [ADEME, 2006] *Les chiffres clés du bâtiment - Énergie - Environnement*, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2006.
- [Adnot, 2007a] *Certification guide derived from work package 4.1. Supply side : measurement and verification of energy efficiency projects*, J. ADNOT, L. M. BARROSO, B. DUPLESSIS, A. ALMEIDA, P. FONSECA, P. MOURA, N. LABANCA, Guide de certification issu du rapport de la tâche 4.1 du projet EuroWhiteCert, www.eurowhitecert.org, 2007.
- [Adnot, 2007b] *Work package 4.3 - Demand side : identifying alternative market participant types and structuring the demand side*, J. ADNOT, B. DUPLESSIS, N. LABANCA, S. REZESSY, Rapport de la tâche 4.3 du projet EuroWhiteCert, www.eurowhitecert.org, 2007.
- [AICVF, 2000] *Calcul prévisionnel des consommations d'énergie - Bâtiments non-résidentiels*, AICVF, Collection des guides de l'AICVF, volume 6, Juillet 2000.
- [AIE, 1987] *Source Book for Energy Auditors*, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annexe XI - Energy Auditing, Swedich Council for Building Research, ISBN : 91-540-4763-3, 1987
- [Arrêté 24 mai 2006] *Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*, Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, Journal Officiel de la République Française n° 121, page 7747 texte n° 14, 25 mai 2006.
- [Arrêté du 19 juin 2006] *Arrêté du 19 juin 2006 définissant les opérations standardisées d'économies d'énergie*, Journal Officiel de la République Française n°156, 7 juillet 2006.
- [ASHRAE, 2002] *Measurement of Energy and Demand Savings*, ASHRAE, Guideline 14, 2002
- [ASHRAE, 2005] *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, SI Editions, ISBN : 1931862702, Juillet 2005
- [ASHRAE, 2008] *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, SI Editions, ISBN : 9781933742342, Janvier 2008

-
- [Baltimore] *Programme de sélection intégrée - Version 3/1.0*, Baltimore Aircoil Company.
- [Bamba, 2004] *Outil d'aide à la conduite d'une installation de froid*, M. BAMBA, Mémoire de DEA « Conversion de l'énergie », Université Paris VI - Mines de Paris, 2004.
- [Bertoldi, 2003] *How are EU ESCOs behaving and how to create a real ESCO market ?*, P. BERTOLDI, V. BERRUTTO, M. de RENZIO, J. ADNOT and E. VINE, Proceedings of ECEEE 2003 Summer Study (5.041), Juin 2003.
- [Bertoldi, 2005] *Energy service companies in European countries : Current status and a strategy to foster their development*, P. BERTOLDI, S. REZESSY, E. VINE, Energy Policy 34 (2006) 1818-1832, 25 février 2005.
- [Björkqvist, 1993] *A study of transaction costs for energy investments in the residential sector*, O. BJÖRKQVIST, C.O. WENE, ECEEE 1993 Summer Study Proceeding, juin 1993.
- [Bory, 2008] *Analyse et simulation de défauts des équipements de climatisation en vue d'un audit énergétique*, D. BORY, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 8 septembre 2008.
- [Circulaire CMP, 2006] *Circulaire du 3 août 2006 portant manuel d'application du code des marchés publics*, Journal Officiel de la République Française, 4 août 2006.
- [ClubS2E, 2007] *Les services d'efficacité énergétique*, ClubS2E, Guide à l'attention des clients privés et publics, www.clubs2e.org, juin 2007.
- [CGCT, 2006] *Code Général des Collectivités Territoriales, mis à jour par l'Ordonnance n° 2006-460 du 21 avril 2006 (en vigueur le 1er juillet 2006)*, Journal Officiel de la République Française, 22 avril 2006.
- [CMP, 2006] *Décret n° 2006-975 du 1er août 2006 portant code des marchés publics*, Journal Officiel de la République Française n° 179, 4 août 2006.
- [COMOP3, 2008] *Rapport du Comité Opérationnel « Rénovation des bâtiments existants »*, rapport au Ministre d'Etat, Ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, C. MARTINAND, H. GISSEROT, Février 2008.
- [COMOP4, 2008] *Rapport du Comité Opérationnel « Etat exemplaire »*, rapport au Ministre d'Etat, Ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, Ph. PELLETIER, Avril 2008.
- [ConsoClim, 2002] *Etude de la sensibilité et validation in situ de la méthode ConsoClim*, J.-M. ALESSANDRINI, A. BOHLER, E. FLEURY, D. MARCHIO, J.R. MILLET, S. ROUJOL, P. STABAT, Rapport Final, DDD/CVA-02.140R, CSTB, 2002.
- [CTI, 2003] *Guide to Working with Energy Service Companies in Central Europe*, Climate Technology Initiative (CTI) Secretariat, Tokyo, 2003.
- [Day, 2004] *Cooling energy consumption and temperature*, T. Day, Market Transformation Programme Seminar, BRE 19 March 2004, 19 Mars 2004.
-

-
- [Directive 96/92/CE] *Directive 96/92/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 décembre 1996 concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité*, Journal Officiel de l'Union Européenne, L027, 30 janvier 1997
- [Directive 98/30/CE] *Directive 98/30/CE du Parlement Européen et du Conseil Européen du 22 juin 1998 concernant les règles communes pour le marché intérieur du gaz*, Journal Officiel de l'Union Européenne, L204/1, 21 juillet 1998
- [Directive 2003/54/CE] *Directive 2003/54/CE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2003 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et abrogeant la directive 96/92/CE*, L176, 15 juillet 2003
- [Directive 2003/55/CE] *Directive 2003/55/CE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2003 concernant des règles communes pour le marché intérieur du gaz naturel et abrogeant la directive 98/30/CE*, L176, 15 juillet 2003
- [Directive 2004/17] *Directive 2004/17/CE du Parlement Européen et du Conseil du 31 mars 2004 portant coordination des procédures de passation des marchés dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux*, Journal Officiel de l'Union Européenne, L 134/1, 30 avril 2004.
- [Directive 2004/18] *Directive 2004/18/CE du Parlement Européen et du Conseil du 31 mars 2004 relative à la coordination des procédures de passation des marchés publics de travaux, de fournitures et de services*, Journal Officiel de l'Union Européenne, L 134/114, 30 avril 2004.
- [Directive 2006/32] *Directive 2006/32/CE du Parlement Européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques*, Journal Officiel de l'Union Européenne, L 114/64, 27 avril 2006.
- [Draper, 1966] *Applied Regression Analysis*, N. DRAPER, H. SMITH, Wiley Interscience, ISBN : 04-712-2170-8, 1966.
- [Duplessis, 2007] *Simulating a European-wide white certificates scheme : design issues and main lessons*, B. DUPLESSIS, J. ADNOT, P. MOURA, N. LABANCA, 2007 ECEEE Summer Study Proceedings, juin 2007.
- [Dupont, 2006] *Potentiel d'économies d'énergie par les services énergétiques - Application au cycle de vie des équipements de conversion de l'énergie*, M. DUPONT, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 5 décembre 2006.
- [ECS, 2003] *Third Part Financing – Achieving its potential*, Energy Charter Secretariat, ISBN 90-5948-017-1, Bruxelles, 2003.
- [EECAC, 2003] *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECAC)*, Rapport final du projet EECAC, avril 2003
- [Energyplus, 2008] *Energyplus : Building Energy Simulation Software*, [http ://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/), 2008.
-

-
- [Enertech, 2002] *Etude des paramètres influant sur les consommations de climatisation dans les immeubles de bureau*, ENERTECH - Ingénierie énergétique et fluides, Etude financée par l'Agence Régionale de l'Energie Provence Alpes Côte d'Azur, Rapport Final, mars 2002.
- [Evan, 2003] *Puissance en courant continu et en courant alternatif*, J-R. EVAN, Techniques de l'Ingénieur, R 1025, Editions T.I., décembre 2003.
- [Fels, 1986] *Measuring Energy Savings : the Scorekeeping Approach*, M. FELS, Energy and Buildings, vol. 9, n° 1 & 2, 1986.
- [FEMP, 2008] *M&V Guidelines : Measurement and Verification for Federal Energy Projects*, Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy, Avril 2008.
- [Filfli, 2006] *Optimisation bâtiment/système pour minimiser les consommations dues à la climatisation*, S. FILFLI, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 4 décembre 2006.
- [Gaudioso, 2007] *White Certificate Schemes and European Emissions Trading System*, Rapport de la tâche 3.1 du projet EuroWhiteCert, www.eurowhitecert.org, 2007.
- [GEEBP, 2000] *Energy Use in Buildings - Energy Consumption Guide 19*, UK Government Energy Efficiency Best Practice Programm, décembre 2000.
- [GEM/CC, 2007] *Guide de rédaction des clauses techniques des marchés publics d'exploitation de chauffage avec ou sans gros entretien des matériels et avec obligation de résultat*, Groupe d'Etude des Marchés de Chauffage et de Climatisation (GEM/CC), décision n° 2007-17 du Comité exécutif de l'Observatoire Économique de l'Achat Public, 4 mai 2007.
- [Gimélec, 2007] *Optimisation de la performance énergétique des bâtiments publics par la mise en œuvre des Contrats de Partenariats*, Gimélec, Guide à l'usage des acheteurs publics, avril 2007.
- [GreenEffect, 2005] *La consommation d'électricité dans les bâtiments de bureaux*, E. JEANJEAN, Intervention dans le cadre du Projet GreenEffect, Rhônalpénergie-Environnement, 20 janvier 2005.
- [Hein, 1995] *Transaction costs of energy efficiency improvement*, L.G. HEIN, K. BLOK, ECEEE 1995 Summer Study Proceeding, juin 1995.
- [IGD, 2006] *Les partenariats Public-Privé en France*, Institut de la Gestion Déléguée, communication, Décembre 2006.
- [IPMVP, 2007] *Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings*, Efficiency Valuation Organization, International Performance Measurement and Verification Protocol, Volume 1, avril 2007.
- [IPPC, 2001] *Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems*, European Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Décembre 2001.
-

-
- [Loi n°77-804] *Loi n°77-804 du 19 juillet 1977 concernant certains contrats de fourniture et d'exploitation de chauffage et relatif aux économies d'énergie*, Journal Officiel de la République Française, 20 juillet 1977.
- [Loi n°93-122] *Loi n°93-122 du 29 Janvier 1993 relative à la prévention de la corruption et à la transparence de la vie économique et des procédures publiques*, Journal Officiel de la République Française, 29 janvier 1993.
- [Loi POPE, 2005] *Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*, Journal Officiel de la République Française, 13 juillet 2005.
- [Loi n°2008-735] *Loi n°2008-735 du 28 juillet 2008 relative aux contrats de partenariat*, Journal Officiel de la République Française, 29 juillet 2008.
- [Loi MOP, 1985] . *Loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée - Version consolidée du 22 février 2007*, Journal Officiel de la République Française, 22 février 2007
- [Marchio, 2001] *Guide technique d'audit énergétique des bâtiments*, D. MARCHIO, I. ARDITI, C. CARRETERO, M. KRARTI, 2001
- [Ménéménis, 2008] *Code des marchés publics et autres contrats*, A. MENEMENIS, Editions Dalloz, 2008.
- [Méthode Th-C-E, 2005] *Arrêté du 19 juillet 2006 portant approbation de la méthode de calcul Th-C-E prévue aux articles 4 et 5 de l'arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*, Journal Officiel de la République Française, 22 février 2007.
- [Mundaca, 2008] *Market behaviour and the to-trade-or-not-to-trade dilemma in 'tradable white certificate' schemes*, L. MUNDACA, B. DUPLESSIS, N. LABANCA, L. NEIJ, L. PAGLIANO, Energy Efficiency, Volume 1 n°4, novembre 2008
- [Moisan, 2004] *Les certificats blancs : Un nouvel instrument de marché pour la maîtrise de l'énergie*, F. MOISAN, Revue de l'énergie, ISSN 0303-240X, n°553, 2004.
- [NAESCO, 2007] *What is an ESCO ?*, National Association of Energy Services Companies (NAESCO), [http ://www.naesco.org/about/esco.htm](http://www.naesco.org/about/esco.htm), 2007.
- [NF 14511] *Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur avec compresseur entraîné par moteur électrique pour le chauffage et la réfrigération*, Agence Française de Normalisation (AFNOR), NF EN 14511, ISSN 0335-3931, septembre 2004.
- [NF 14705] *Méthode de mesure et évaluation des performances thermiques des aéroréfrigérants humides*, Agence Française de Normalisation (AFNOR), NF EN 14705, ISSN 0335-3931, octobre 2005.
- [Ord. 2004-559] *Ordonnance 2004-559 du 17 juin 2004 sur les contrats de partenariat*, Version consolidée au 30 juillet 2008, Journal officiel n°141 de la République Française, 19 juin 2004.
-

-
- [PAEE UE, 2006] *Plan d'action pour l'efficacité énergétique : réaliser le potentiel*, Communication de la Commission Européenne, Commission des Communautés Européennes, COM(2006)545 final, 19 octobre 2006.
- [Perifem, 2005] *Services énergétiques dans la grande distribution*, ESOPE, Étude ADEME-PERIFEM 04D152/3, décembre 2005.
- [Recknagel, 1986] *Le Recknagel - Manuel pratique du génie climatique*, RECKNAGEL, SPRENGER, HÖNMANN, 2ème édition, PYC EDITIONS, 1986.
- [Rivière, 2004] *Performances saisonnières des groupes de production d'eau glacée*, P. RIVIERE, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 11 mai 2004.
- [Roujol, 2003] *Méthodes de calcul prévisionnel des consommations d'énergie des bâtiments climatisés - Incertitudes et validation*, S. ROUJOL, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 16 décembre 2003.
- [Rundquist, 1993] *Calculating lighting and HVAC interactions*, RUNDQUIST R.A., JOHNSON K.F., AUMANN D.J, ASHRAE Journal (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), Volume/Issue : 35 :11, Novembre 1993.
- [Stabat, 2003] *Modélisation de composants de systèmes de climatisation mettant en œuvre l'adsorption et l'évaporation de l'eau*, P. STABAT, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 10 mars 2003.
- [Sigonnez, 2006] *Choix d'un débitmètre*, P. SIGONNEZ, Techniques de l'Ingénieur, R 2200, Editions T.I., septembre 2006.
- [Trnsys, 2007] *The Transient Energy System Simulation Tool*, [http ://www.trnsys.com/](http://www.trnsys.com/), 2007.
- [UTE C 18-510] *Recueil d'instructions générales de sécurité d'ordre électrique*, Union Technique de l'Electricité (UTE), 2004.
- [Voogt, 2007] *Review and analysis of national and regional certificate schemes*, M. VOOGT, M. LUTTMER, E. VISSER, Rapport de la tâche 2 du projet EuroWhiteCert, Ecofys, www.eurowhitecert.org, 2007.
- [Westling, 2003] *IEA DSM Task X Performance Contracting*, H. WESTLING et al., Summary Report, Final, Mai 2003.

Table des figures

Chapitre 1	9
1.1 De la distribution des énergies à leur usage final.	10
1.2 Les prestations des services énergétiques dans le cycle de vie des installations de transformation d'énergie finale.	11
1.3 Contenu des contrats de services énergétiques : deux cas de contractualisation différents pour une même combinaison de prestations techniques. . . .	13
1.4 Portée de différents contrats de services énergétiques.	14
1.5 Contenu des contrats de services énergétiques issus de l'attribution de marchés publics d'exploitation des installations de chauffage.	17
1.6 Portée d'un contrat de chauffage (exemple).	18
1.7 Portée et contenu d'un contrat de chauffage typique des marchés publics : « Marché d'exploitation des installations de chauffage, P1 + P2 ».	18
1.8 Marchés d'exploitation des installations de chauffage - 1 ^{er} cas : rémunération de la prestation « Approvisionnement en énergie » par prix unitaire de l'unité d'énergie finale consommée.	23
1.9 Marchés d'exploitation des installations de chauffage - 2 ^e cas : rémunération de la prestation « Achat d'énergie » par prix unitaire de l'unité d'énergie utile consommée.	24
1.10 Contrat de fourniture de froid - 1 ^{er} cas : la fourniture de froid fait l'objet d'un contrat en aval de la fourniture d'électricité.	27
1.11 Contrat de fourniture de froid - 2 ^{ème} cas : la fourniture de froid est incluse dans un contrat « électricité » global.	27
Chapitre 2	31
2.1 Influence directe des prestations élémentaires sur la performance énergétique des installations.	34
2.2 Interactions des prestations élémentaires sur la performance énergétique des installations.	35
2.3 Représentation de l'efficacité énergétique portée par un acteur dans le cadre d'un contrat de service énergétique.	38
2.4 Représentation de l'efficacité énergétique globale d'un contrat de service énergétique.	39
2.5 Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Prestation Forfait ».	40

2.6	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Marché Forfait ».	41
2.7	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Marché Comptage ».	42
2.8	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre d'un contrat de type « Combustible Prestation ».	43
2.9	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le prestataire dans le cadre des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.	44
2.10	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Prestation Forfait ».	45
2.11	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Marché Forfait » et « Marché Température ».	46
2.12	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Marché Comptage ».	47
2.13	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats de type « Combustible Prestation ».	48
2.14	Représentation de l'efficacité énergétique portée par le client dans le cadre des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique.	48
2.15	Incitation à l'efficacité énergétique des différents contrats d'exploitation.	50
Chapitre 3		51
3.1	Répartition des économies d'énergie ou des surconsommations d'énergie entre le prestataire et le client dans le cadre d'un contrat type d'exploitation des installations de chauffage ([GEM/CC, 2007]).	52
3.2	Prestations prises traditionnellement en charge par une ESCO.	56
3.3	Illustration de la répartition des économies entre client, prestataire de services énergétiques et prestataire de services de financement dans le cadre d'un contrat de performance énergétique.	57
3.4	Schéma du modèle « économies garanties » proposé par les ESCOs.	58
3.5	Schéma du modèle « économies partagées » proposé par les ESCOs.	58
3.6	Procédure type pour la mise en place d'un Contrat de Performance Énergétique.	62
3.7	Illustration du principe d'évaluation des économies d'énergie réalisées dans le cadre d'un contrat de performance énergétique.	64
3.8	Répartition de la consommation d'énergie de l'hypermarché.	69
3.9	Répartition de la consommation d'énergie de la galerie marchande.	69
Chapitre 8		75
4.1	Schéma du déroulement de la procédure d'appel d'offre « classique ».	80
4.2	Schéma du déroulement de la procédure négociée.	84
4.3	Schéma du déroulement de la procédure de dialogue compétitif.	85
4.4	Potentiel d'accès à l'innovation des différentes procédures d'appel d'offres.	88

Chapitre 4	101
5.1 Périmètres pour l'évaluation des performances énergétiques des systèmes. . .	102
5.2 Description des conditions de fonctionnement d'un système évalué.	103
5.3 Représentation schématique des modèles de simulation de bâtiments. . . .	109
5.4 Modèles de régression linéaire pour l'approche « ensemble du bâtiment » (d'après [ASHRAE, 2008]).	117
5.5 Procédure d'aide à la sélection des protocoles d'évaluation (d'après [IPMVP, 2007]).	131
 Chapitre 5	 133
6.1 Répartition des consommations d'énergie finale des bâtiments du secteur tertiaire.	133
6.2 Représentation schématique des systèmes de climatisation à détente directe (d'après [Dupont, 2006]).	136
6.3 Représentation synoptique d'un système de climatisation « tout air » ali- menté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).	137
6.4 Représentation schématique d'un système de climatisation « tout eau » alimenté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).	137
6.5 Représentation schématique d'un système de climatisation mixte alimenté par un groupe de production d'eau glacée (d'après [Dupont, 2006]).	138
6.6 Représentation schématique des systèmes d'évacuation de la chaleur ([Dupont, 2006]).	139
6.7 Représentation schématique des installations de production d'eau glacée. .	140
6.8 Périmètre pour l'évaluation des projets d'amélioration des installations de production d'eau glacée.	142
6.9 Grandeurs pour l'évaluation des performances des groupes de production d'eau glacée à condensation à air [NF 14511].	144
6.10 Grandeurs pour l'évaluation des performances des groupes de production d'eau glacée à condensation à eau [NF 14511].	144
 Chapitre 6	 157
7.1 Comparaison entre la puissance électrique absorbée mesurée et la puissance électrique estimée du groupe n°5.	162
7.2 Comparaison entre la puissance électrique absorbée estimée et la puissance électrique mesurée (groupe n°5).	162
7.3 Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage sur don- nées mesurées (Groupe 4).	166
7.4 Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la pleine charge avec valeurs par défaut (Groupe 5).	168
7.5 Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la charge partielle sur données mesurées pour le groupe 2.	172
7.6 Illustration de la performance du modèle REFLIQ - Paramétrage de la charge partielle sur données « constructeurs » (indice <i>ESEER</i>) pour le groupe 2.	172
7.7 Comparaison entre l'évolution dans le temps de la mesure de la puissance électrique absorbée par la tour et de son estimation.	176
7.8 Comparaison entre la puissance électrique absorbée par la tour mesurée et avec son estimation.	176

7.9	Comparaison des résultats donnés par le modèle TAO paramétré sur données « constructeurs ».	179
7.10	Comparaison des résultats donnés par le modèle TAO paramétré sur données mesurées.	179
7.11	Abaque pour la détermination du débit d'air relatif minimum ([Recknagel, 1986]).	180
7.12	Comparaison des résultats donnés par le modèle « Recknagel » paramétré sur données « constructeurs ».	181
7.13	Comparaison des résultats donnés par le modèle « Recknagel » paramétré sur données mesurées.	182
7.14	Mise en évidence de l'ordre de démarrage de groupes de production d'eau glacée.	184
7.15	Mise en évidence des niveaux de puissance appelée déclenchant le démarrage des groupes de production d'eau glacée.	184
7.16	Représentation synoptique des relations explicatives des performances de groupes de production d'eau glacée.	186
7.17	Représentation synoptique des relations explicatives des performances de tours de refroidissement.	186
7.18	Représentation synoptique de la procédure de calcul des performances énergétiques d'une installation de production d'eau glacée.	187
7.19	Reconstitution du fonctionnement d'une installation de production d'eau glacée - Illustration du fonctionnement en cascade.	188
Chapitre 7		195
8.1	Méthode de calcul du montant de kWh_{cumac} pour l'installation d'une chaudière à condensation dans un immeuble tertiaire (fiche BAT-Th-02 dans [Arrêté du 19 juin 2006]).	200
8.2	Représentation de la procédure de calcul des performances énergétiques d'une installation de production d'eau glacée.	203
8.3	Proposition de méthode de calcul des consommations d'énergies annuelles type dans le cadre d'un système de certificats d'économie d'énergie.	211

Liste des tableaux

Chapitre 1	9
1.1 Désignation des marchés d'exploitation des installations de chauffage selon le type de rémunération de la prestation « approvisionnement en énergie ».	19
1.2 Typologie des marchés d'exploitation des installations de chauffage.	25
1.3 Typologie des marchés d'exploitation des installations de production d'énergie frigorifique.	30
Chapitre 2	31
2.1 Influence des modalités de rémunération d'un contrat de service sur les parties prenantes du contrat.	37
2.2 Portée optimale pour l'amélioration des performances énergétique des contrats d'exploitation des installations de chauffage et de production frigorifique. .	49
Chapitre 3	51
3.1 Partage des risques dans les offres de services énergétiques des ESCOs . . .	59
Chapitre 8	75
4.1 Classification comparée des contrats de commande publique en droit français et communautaire (d'après [IGD, 2006]).	77
4.2 Seuil des procédures à suivre pour la passation d'appel d'offres pour les collectivités locales ([CMP, 2006])	81
4.3 Tableau comparatif des différents modes de la commande publique ([Ménéménis, 2008])	92
Chapitre 4	101
5.1 Critères statistiques pour la sélection des modèles de régression explicatif de la consommation d'énergie dans le cadre de l'approche « ensemble du bâtiment » (d'après [FEMP, 2008]).	116
5.2 Table pour la détection des effets interactifs d'un projet d'amélioration dans un immeuble de bureaux	122
5.3 Caractéristiques des approches ou options des protocoles d'évaluation. . . .	127
Chapitre 5	133
6.1 Consommation d'énergie finale par usages des bâtiments du secteur tertiaire en 2001 ([ADEME, 2005]).	134

6.2	Typologie des installations de climatisation pour immeubles de bureaux. . .	136
6.3	Parc de bâtiments tertiaires climatisés en fonction du type d'équipement de production d'énergie frigorifique.	139
6.4	Grandeurs à mesurer pour la caractérisation des performances d'un groupe de production d'eau glacée.	146
6.5	Précision des instruments de mesure requise pour la caractérisation des performances d'un groupe de production d'eau glacée ([ASHRAE, 2002]). .	149
Chapitre 6		157
7.1	Caractéristiques principales des groupes de production d'eau glacée observés.	157
7.2	Domaines de variation des conditions de fonctionnement des groupes de production d'eau glacée observés.	158
7.3	Validation des relations explicatives de la performances des groupes de production d'eau glacée observés.	160
7.4	Analyse pour la sélection des modèles de groupes de production d'eau glacée (d'après [Roujol, 2003])	164
7.5	Validation du modèle REFLIQ sur les données du groupe 4.	166
7.6	Valeurs par défaut des coefficients du modèle REFLIQ (d'après [ConsoClim, 2002])	167
7.7	Validation statistique du paramétrage du modèle de charge partielle sur les groupes observés.	168
7.8	Conditions de fonctionnement normalisées pour la détermination du <i>ESEER</i> d'un groupe de production d'eau glacée.	170
7.9	Comparaison des résultats obtenus par REFLIQ selon la méthode de détermination du paramètre de charge partielle.	171
7.10	Comparaison du comportement à charge partielle de trois groupes de production d'eau glacée issus de la même gamme de produit.	174
7.11	Conditions de fonctionnement de la tour de refroidissement instrumentée. .	174
7.12	Validation statistique des relations explicatives.	175
7.13	Valeurs par défaut de la constante C_t pour le paramétrage du modèle de tour de refroidissement humide ouverte « Recknagel » (d'après [Recknagel, 1986])	182
7.14	Origine des données pouvant servir au paramétrage des modèles de groupes de production d'eau glacée et de tour de refroidissement.	193
Chapitre 7		195
8.1	Entrées et paramètres pour le calcul des consommations d'énergie d'une installation de production d'eau glacée.	203
8.2	Origine des données nécessaires au paramétrage des modèles de groupes de production d'eau glacée et de tour de refroidissement dans le cadre d'un système de certificats blancs.	204
8.3	Typologie des bâtiments de bureaux climatisés (d'après [Filfi, 2006]). . .	205
8.4	Type de système associé aux différents types de bâtiment (d'après [Filfi, 2006]).	206
8.5	Courbe de charge type réduite - Exemple de la configuration 1a-DAC à Trappes.	208
8.6	Influence de la réduction des courbes de charge sur le calcul des consommations d'énergie.	209

Annexe : Courbes de charge réduites pour la caractérisation des besoins de climatisation d'immeubles de bureaux types.

Courbe de charge type réduite - Configuration 1a-DAV à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7260	550	263	208	135	124	69	57	39	55
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,5	19,1	21,5	22,7	23,6	24,6	24,9	25,7	26,2	27,2
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,9	15,0	17,2	18,4	19,1	19,7	20,3	20,9	21,7	22,6
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,04	2,42	4,18	5,93	7,60	9,45	11,00	12,79	14,72	16,50

Courbe de charge type réduite - Configuration 1a-VC à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6681	490	444	453	360	196	95	23	11	7
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	15,2	17,9	20,9	23,0	24,7	25,5	27,0	25,6	27,0
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,8	11,7	14,2	16,9	18,4	19,6	20,2	21,9	21,9	22,9
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,17	7,06	11,72	16,51	20,98	25,46	29,85	35,27	39,38	44,91

Courbe de charge type réduite - Configuration 1a-VC à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7106	387	442	367	243	143	51	18	1	2
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	8,6	12,2	14,7	17,3	19,8	21,9	23,8	25,3	22,4	24,6
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,5	10,0	12,1	13,8	15,1	16,4	17,4	18,2	17,6	17,7
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,11	5,73	9,62	13,33	17,21	20,78	24,55	28,75	31,92	37,53

Courbe de charge type réduite - Configuration 1b-DAV à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7110	677	266	189	143	90	95	59	48	83
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	18,6	21,3	22,6	23,5	24,1	24,8	25,1	25,9	26,9
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,8	14,6	17,0	18,2	19,0	19,6	19,8	20,3	21,1	22,3
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,01	2,10	3,71	5,27	6,82	8,40	9,81	11,39	12,83	14,60

Courbe de charge type réduite - Configuration 1b-DAV à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7925	444	176	81	44	31	23	16	15	5
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	9,0	17,6	20,2	21,9	23,1	23,5	24,5	24,9	26,1	27,0
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,9	14,0	15,4	16,5	17,1	17,6	18,2	18,3	18,9	19,7
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	1,68	2,89	4,11	5,27	6,46	7,54	8,89	10,00	11,36

Courbe de charge type réduite - Configuration 1b-VC à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6318	788	681	456	280	123	66	31	9	8
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	14,2	18,1	21,6	23,8	25,4	25,7	26,5	27,4	28,0
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,9	10,9	14,2	17,4	18,9	20,3	20,6	21,7	22,5	22,4
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	1,83	2,84	4,04	5,13	6,33	7,47	8,61	9,90	10,85

Courbe de charge type réduite - Configuration 1b-VC à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6866	619	562	346	194	112	40	15	5	1
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	8,5	11,4	14,7	17,9	20,4	22,6	24,7	25,4	27,2	24,3
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,5	9,4	12,0	14,1	15,5	16,8	17,6	18,3	18,3	17,5
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	1,47	2,28	3,22	4,13	5,02	5,97	6,92	7,78	9,28

Courbe de charge type réduite - Configuration 1c-DAV à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7294	523	242	180	125	81	82	71	58	104
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,5	19,2	21,4	22,5	23,6	24,0	24,5	25,0	25,3	26,8
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,9	15,2	17,1	18,2	18,8	19,4	19,7	20,0	20,8	22,1
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,05	2,41	4,17	5,96	7,69	9,35	11,15	12,85	14,58	16,39

Courbe de charge type réduite - Configuration 1c-DAV à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	8128	338	121	59	40	30	12	19	10	3
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	9,2	18,7	21,1	22,6	23,0	24,2	24,4	25,1	26,6	26,2
Température humide moyenne de l'air en [°C]	8,0	14,7	15,9	16,9	17,5	17,9	18,2	18,4	19,0	19,9
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,03	2,02	3,53	4,99	6,48	7,89	9,26	10,81	12,28	13,91

Courbe de charge type réduite - Configuration 1c-VC à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6554	1082	520	290	156	73	47	23	10	5
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	16,1	21,2	23,3	24,5	25,4	26,0	26,7	27,0	27,7
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,9	12,5	17,1	18,7	19,4	20,2	21,2	22,0	21,8	22,6
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,07	2,31	4,02	5,65	7,29	8,88	10,64	12,22	13,97	15,29

Courbe de charge type réduite - Configuration 1c-VC à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7925	444	176	81	44	31	23	16	15	5
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	9,0	17,6	20,2	21,9	23,1	23,5	24,5	24,9	26,1	27,0
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,9	14,0	15,4	16,5	17,1	17,6	18,2	18,3	18,9	19,7
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	1,68	2,89	4,11	5,27	6,46	7,54	8,89	10,00	11,36

Courbe de charge type réduite - Configuration 2-VC à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6517	493	677	540	305	153	52	13	6	4
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	14,3	17,6	21,4	23,9	25,4	26,5	27,1	27,8	27,4
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,8	10,9	13,8	17,3	19,1	20,2	21,2	21,8	22,5	23,0
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	0,57	0,80	1,13	1,45	1,78	2,09	2,45	2,71	3,15

Courbe de charge type réduite - Configuration 2-VC à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7046		541	565	337	169	68	20	10	4
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	8,6		12,1	15,6	18,8	21,5	24,0	25,1	26,2	26,3
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,5		10,0	12,7	14,7	16,4	17,5	18,0	18,2	18,0
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00		1,67	2,24	2,88	3,54	4,21	4,75	5,64	6,21

Courbe de charge type réduite - Configuration 3-VC à Nice.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	6366	1174	554	353	159	75	44	22	11	2
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	13,4	15,3	20,7	23,2	24,7	25,4	26,1	26,7	27,4	28,5
Température humide moyenne de l'air en [°C]	10,9	11,8	16,7	18,6	19,5	20,2	21,4	22,3	21,7	22,7
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	2,03	3,56	4,98	6,41	7,91	9,31	10,74	12,07	14,09

Courbe de charge type réduite - Configuration 3-VC à Trappes.

	Déciles de puissance (par rapport à la puissance maximale)									
	1 ^{er}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	5 ^{eme}	6 ^{eme}	7 ^{eme}	8 ^{eme}	9 ^{eme}	10 ^{eme}
Nombre d'heures	7156	405	567	332	162	77	35	15	10	1
Température sèche moyenne de l'air en [°C]	8,6	12,2	15,3	18,6	21,2	23,0	23,9	24,7	26,8	24,3
Température humide moyenne de l'air en [°C]	7,5	9,9	12,5	14,6	16,2	16,9	17,8	17,7	18,1	17,5
Puissance frigorifique moyenne en [W/m ²]	0,00	1,66	2,31	3,26	4,20	5,17	6,15	6,93	8,03	9,46

MISE EN ŒUVRE DES CONTRATS DE PERFORMANCE ENERGETIQUE POUR L'AMELIORATION DES INSTALLATIONS DE PRODUCTION FRIGORIFIQUE

Résumé

Le contrat de performance énergétiques est une forme contractuelle de services énergétiques dans laquelle les prestataires de services prennent en charge le financement de projets d'amélioration des installations en se rémunérant grâce à la valeur des économies d'énergie générées. Le recours à ce type de contrat, réputé particulièrement efficace, est mis en avant dans les textes communautaires et dans le cadre des politiques publiques nationales en faveur de la maîtrise de la demande en énergie. A ce titre, les contrats de performances énergétiques sont appelés à faire partie intégrante des dispositifs existants en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier dans le cadre des systèmes de certificats d'économie d'énergie, et des outils de la commande publique pour l'amélioration du patrimoine de l'Etat et des collectivités territoriales. Leur mise en œuvre est cependant conditionnée à la mise au point de protocoles adaptés pour l'évaluation des performances énergétiques des installations, notamment lorsque celles-ci dépendent de nombreux paramètres, comme dans le cas des installations de production d'eau glacée.

Après avoir mis en évidence l'efficacité énergétique portée par les contrats de performance, cette thèse analyse les obstacles techniques à la mise en œuvre de ces contrats sur les installations de production d'eau glacée. Dans un second temps, un protocole adapté à l'évaluation d'améliorations typiques de ces installations est proposé en couplant des outils de modélisation et des procédures de mesure légères sur site. Enfin, des propositions d'aménagement de ce protocole sont formulées dans le but de permettre l'intégration des améliorations typiques des installations de production d'eau glacée dans le cadre des dispositifs de certificats d'économie d'énergie, qui semblent ne pouvoir prendre en considération que des actions élémentaires facilement reproductibles.

Mots clés : mesure et vérification des performances, contrat de performance énergétique, installations de production frigorifique, certificats d'économie d'énergie

IMPLEMENTATION OF ENERGY PERFORMANCE CONTRACTS FOR THE IMPROVEMENT OF CHILLED WATER PLANT

Abstract

Energy performance contracting is a contract form for energy services in which providers take over the financing of projects for facilities improvement by prying themselves through the energy saving generated. The use of such contracts, which are deemed particularly effective, is highlighted in the framework of European and national public policies for demand-side management. As such, energy performance contracts are expected to take part of existing devices for energy efficiency improvement of the national and local governments inheritance. However, their implementation depends on the development of suitable protocols for assessing the energy performance of facilities, especially when their performance depends on various parameters such as the chilled water plants.

After having highlighted the energy efficiency carried by energy performance contracting, this thesis analyses the technical obstacles in the way of such contracts implementation. Then, a suitable protocol for assessing typical improvements of chilled water plants is proposed by coupling modeling tools and on-site measurement procedures. Finally, we propose some adjustments of this protocol in order to enable the integration of typical improvements of chiller water plants under the white certificates systems, which seem to consider only elementary and easily reproducible projects.

Key words : energy services, energy performance contracting, white certificates, performance evaluation protocol

Laboratoire d'accueil : Centre d'Energétique - Ecole des Mines de Paris
60 Bd Saint-Michel - F-75272 Paris Cedex 06
Rue Claude Daunesse - B.P. 207 - F-06904 Sophia Antipolis Cedex

Thèse présentée par : Bruno DUPLESSIS le : 2 décembre 2008

Discipline : "Energétique" - Ecole des Mines de Paris
